

Analyse av 4-tomsflasker i kompositt

av

Øyvind Welgaard

MASTEROPPGAVE

For graden

Master i Anvendt matematikk og mekanikk



Masteroppgave
ved

Det matematisk- naturvitenskapelige fakultet

UNIVERSITETET I OSLO

14. Juni 2011

Analyse av 4-tomsflasker i kompositt

av

Øyvind Welgaard

MASTEROPPGAVE

For graden

Master i Anvendt matematikk og mekanikk



Masteroppgave
ved

Det matematisk- naturvitenskapelige fakultet

UNIVERSITETET I OSLO

14. Juni 2011

2011

Analyse av 4-tomsflasker i kompositt

Øyvind Welgaard

<http://www.duo.uio.no/>

Trykk: INFOenheten, FFI

Forord

Jeg vil gjerne få takke mine to veiledere Tom Thorvaldsen og Harald Osnes. Uten dere ville det vært umulig å gjennomføre dette prosjektet. Torbjørn Olsen og Helge Larsen fortjener en stor takk for deres arbeid med å produsere og trykkteste 4-tomsflaskene.

Jeg vil også takke familie og venner for støtte og gode innspill. Spesielt vil jeg takke min sønn Philip for hans tålmodighet når pappa har måttet jobbe med oppgaven og min mor Tordis for lån av bil under innspurten.

Sammendrag

Denne oppgaven omhandler analyse av en 4-tomsflaske i kompositt. Den tar for seg kompositteori og prinsippene for en rakettmotor. I første del blir det sett på en tynnvegget sylinder, der kompositt og kontinuumselementer fra elementanalyseprogrammet Marc Mentat blir sammenlignet med numeriske beregninger og resultater fra det Excel-baserte Laminated tube. I andre del blir resultatene fra tynnvegget sylinder lagt til grunn for elementvalg ved modellering og analyse av 4-tomsflasken.

Innholdsfortegnelse

1	Innledning.....	2
1.1	Generell bakgrunn	2
1.2	Spesifisering av oppgaven	4
1.3	Organisering av oppgaven	5
2	Komposittmaterialer og laminatteori	6
2.1	Komposittmaterialer	6
2.2	Fiberorientering	8
2.3	Ortotrope materialer	9
2.4	Lagoppbygning.....	11
2.5	Beregning av stivhetsmatrise.....	13
2.5.1	Beregning av egenskapene til et lag.....	13
2.5.2	Beregning av egenskapene til et laminat.....	18
2.5.3	Spenningene og tøyingene i hvert lag	28
3	Rakettmotor.....	31
3.1	Oppbygning og virkemåte	31
3.2	Prinsippet bak framdriften til en rakettmotor	32
3.3	Relevans av 4-tomsflaskeanalyser med tanke på analyse av rakettmotorer	33
4	4-toms testflasker	34
4.1	Produksjon.....	35
4.1.1	Aquacore-mandrell.....	35
4.1.2	Vikling.....	36
4.1.3	Herding.....	38
4.2	Testmetoder	38
4.2.1	Trykktesting	39
4.2.2	Materialtesting.....	42
4.3	Hvilke produksjons- og herdefaktorer påvirker egenskapene til trykkflaskene?	43
4.3.1	Spenning i fiberen	43
4.3.2	Konsolideringstrykk	43
4.3.3	Temperaturforløp under herding	44
4.3.4	Viklemønster	45
4.3.5	Hulrom	45

4.3.6	Viklehastighet.....	46
5	Modellering og simulering.....	47
5.1	Programvare benyttet i oppgaven.....	47
5.2	Test av kontinuum- og komposittlementer i Marc.....	52
5.2.1	Geometri.....	52
5.2.2	Lagoppbygning.....	53
5.2.3	Elementtype.....	54
5.2.4	Materialdefinisjon for elementene	57
5.2.5	Randbetingelser.....	58
5.2.6	Påførte laster.....	59
5.2.7	Orientering	61
5.3	Resultater fra sylindermodeill.....	62
5.3.1	Lagoppbygning 1: [$\pm 45/90/\pm 45/90$]	62
5.3.2	Lagoppbygning 2: [0/90/0/90]	69
5.3.3	Lagoppbygning 3: [$\pm 10/90/\pm 30/90$]	72
5.3.4	Oppsummering	77
5.4	4-toms XX0-flaske	78
5.4.1	Geometri.....	79
5.4.2	Randbetingelser.....	80
5.4.3	Påførte laster.....	81
5.4.4	Materialegenskaper	82
5.4.5	Komposittlementer	83
5.4.6	Kontinuumselementer	83
6	Resultater.....	84
6.1	Trykktesting.....	84
6.2	4-tomsmodell.....	84
6.2.1	Indre trykk på 10 MPa.....	84
6.2.2	Indre trykk på 36 MPa.....	85
6.3	Diskusjon.....	86
7	Konklusjon og videre forskning.....	88
7.1	Konklusjon.....	88
7.2	Videre forskning og arbeid.....	88
7.2.1	Elementinndeling	89

7.2.2	Oppdeling av orientering over domen.....	89
7.2.3	Fullskalamodell	89
7.2.4	3D-modell.....	89
Litteraturliste		90
Vedlegg A	Materialverdier	92
Vedlegg B	Marc Mentat input fil	93

Figurliste

Figur 1, Lag med retninger.....	9
Figur 2, Deformasjon av isotropt, anisotropt og ortotropt materiale	10
Figur 3, Eksempel på laminat med fire lag	12
Figur 4, Spesielt ortotropt lag.....	13
Figur 5, Generelt ortotropt lag.....	17
Figur 6, Deformasjon av en del av et laminat utsatt for bøyning.....	19
Figur 7, Tøyning og spenningsvariasjon	23
Figur 8, Normalkrefter og momenter	23
Figur 9, Lagoppbygning.....	25
Figur 10, Rakettmotor	31
Figur 11, Rakettprinsipp.....	32
Figur 12, 4-tomsflaske i kompositt	34
Figur 13, Form til Aquacoremandrell	36
Figur 14, Form til Aquacoremandrell	36
Figur 15, Metallendestykke.....	36
Figur 16, Metallendestykke.....	36
Figur 17, Metallstag	36
Figur 18, Aquacore.....	36
Figur 19, Vikling av helicallag.....	37
Figur 20, Vikling av helicallag.....	37
Figur 21, Vikling av helicallag.....	37
Figur 22, Vikling av hooplag	37
Figur 23, Typisk herdesyklus	38
Figur 24, 4-tomsflaske klar for kvalitetstest.....	39
Figur 25, 4-tomsflaske utsatt for sprengtest.....	40
Figur 26, Beskyttelseskammer åpent	41
Figur 27, Beskyttelseskammer lukket	41
Figur 28, Strekktesting av materiale	42
Figur 29, Hoop- og helicallag	45
Figur 30, Marc Mentat skjermbilde.....	47
Figur 31, Patran skjermbilde	48
Figur 32, Skjermbilde av Python.....	49
Figur 33, Laminated tube skjermbilde	50
Figur 34, MATLAB skjermbilde	51
Figur 35, Geometri til sylinder.....	52
Figur 36, Tilfelle 1: Sammenslåtte stivhetsmatriser.....	53
Figur 37, Tilfelle 2: Separate stivhetsmatriser	54
Figur 38, Integrasjonspunkter for element 10, hentet fra [6]	55
Figur 39, Integrasjonspunkter for element 20, hentet fra [6]	56
Figur 40, Integrasjonspunkter for element 152, hentet fra Marc Mentat element library.....	57
Figur 41, Randbetingelser for åpen sylinder	58
Figur 42, Påførte laster åpen sylinder.....	59

Figur 43, Påførte for lukket sylinder	60
Figur 44, Orientering.....	61
Figur 45, Lagoppbygning 1	62
Figur 46, Lagoppbygning 2.....	69
Figur 47, Lagoppbygning 3	72
Figur 48, 4-tomsflaske.....	78
Figur 49, Geometri 4-tomsflaske	79
Figur 50, Randbetingelser 4-tomsflaske.....	80
Figur 51, Påførte laster 4-tomsflaske	81
Figur 52, Materialelegenskaper 4-tomsflaske	82

Tabelliste

Tabell 1, Materialelegenskaper for karbonfiber.....	7
Tabell 2, Materialelegenskaper for epoksy	8
Tabell 3, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa).....	63
Tabell 4, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Åpen sylinder, forskyvninger (mm)	63
Tabell 5, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)	63
Tabell 6, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Lukket sylinder, forskyvninger (mm)	64
Tabell 7, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa).....	64
Tabell 8, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Åpen sylinder, forskyvninger (MPa).....	64
Tabell 9, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)	65
Tabell 10, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Lukket sylinder, forskyvninger (mm)	65
Tabell 11, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa).....	65
Tabell 12, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Åpen sylinder, forskyvninger (mm)	66
Tabell 13, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)	66
Tabell 14, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Lukket sylinder, forskyvninger (mm)	66
Tabell 15, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa).....	67
Tabell 16, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Åpen sylinder, forskyvninger (mm)	67
Tabell 17, Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa).....	67
Tabell 18, Lukket sylinder, forskyvninger (mm)	67
Tabell 19, $0/90/0/90$ Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa)	69
Tabell 20, $0/90/0/90$ Åpen sylinder, forskyvninger (mm)	69
Tabell 21, $0/90/0/90$ Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)	70
Tabell 22, $0/90/0/90$ Lukket sylinder, forskyvninger (mm).....	70
Tabell 23, $0/90/0/90$ Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa)	70
Tabell 24, $0/90/0/90$ Åpen sylinder, forskyvninger (mm)	71
Tabell 25, $0/90/0/90$ Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)	71
Tabell 26, Lukket sylinder, forskyvninger (mm)	71
Tabell 27, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa).....	72
Tabell 28, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Åpen sylinder, forskyvninger (mm)	72
Tabell 29, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)	73

Tabell 30, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Lukket sylinder, forskyvninger (mm)	73
Tabell 31, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa).....	73
Tabell 32, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Åpen sylinder, forskyvninger (mm)	74
Tabell 33, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)	74
Tabell 34, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Lukket sylinder, forskyvninger (mm)	74
Tabell 35, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa).....	75
Tabell 36, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Åpen sylinder, forskyvninger (mm)	75
Tabell 37, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)	75
Tabell 38, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Lukket sylinder, forskyvninger (mm)	75
Tabell 39, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa).....	76
Tabell 40, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Åpen sylinder, forskyvninger (mm)	76
Tabell 41, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)	76
Tabell 42, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Lukket sylinder, forskyvninger (mm)	77
Tabell 43, Resultater fra trykktesting	84
Tabell 44, Lengdeutvidelse ved indre trykk på 10 MPa, alle verdier i mm	84
Tabell 45, Kontinuumselementer, spenninger i planet ved indre trykk på 10 MPa, alle verdier i MPa	85
Tabell 46, Komposittlementer, spenninger i planet ved indre trykk på 10 MPa, alle verdier i MPa	85
Tabell 47, Lengdeutvidelse ved indre trykk på 36 MPa, alle verdier i mm	85
Tabell 48, Kontinuumselementer, spenninger i planet ved indre trykk på 36 MPa, alle verdier i MPa	86
Tabell 49, Komposittlementer, spenninger i planet ved indre trykk på 36 MPa, alle verdier i MPa	86

1 Innledning

1.1 Generell bakgrunn

Ved FFI utvikles og produseres det forskjellige typer rakettmotorer. Dette er konstruksjoner som blir utsatt for store belastninger, og stiller derfor høye krav til styrke og stivhet. I tillegg må vekten holdes nede. Derfor blir disse produsert i karbonfiber/epoksy.

Det er både tidkrevende og kostbart å produsere en rakettmotor. I utviklingen av nye motorer er det derfor hensiktsmessig å etablere datamodeller. Dette gjør det mulig å regne på styrke og stivhet, samt å få økt forståelse av øvrige egenskaper til komposittmotorene. Beregninger og analyser gjøres ved hjelp av elementmetoden, som er en av de mest brukte analysemetodene i konstruksjonsmekanikk. For å verifisere og forbedre datamodellene, gjøres det eksperimentelle tester på fysiske trykkflasker. Testflaskene som benyttes ved FFI er mindre enn fullskala rakettmotorer, men har (tilnærmet) samme geometri. Videre kan samme metoder brukes for å modellere både testflasker og rakettmotorer. Disse trykkflaskene egner seg derfor godt som testobjekter i en utviklingsprosess.

Ved FFI har det blitt utviklet en elementmetodemodell av en 4-tomsflaske i programvarepakken MSC. Marc Mentat. Å lage en representativ elementmodell er ingen enkel oppgave, spesielt ikke for komposittmaterialer der materialegenskapene generelt er anisotrope, det vil si at de er retningsavhengige. Elementanalyseprogramvaren har etter hvert kommet med egne elementer spesiallaget for komposittkonstruksjoner. Disse gjør det enklere å utvikle og modifisere aktuelle modeller. Det har vært knyttet en del usikkerhet til komposittlementene i MSC. Marc, da de har vist seg ikke å gi nøyaktige og korrekte resultater. Derfor er det viktig å kunne studere komposittlementene nøyere og å sammenlikne beregningsresultater med det en oppnår ved bruk av andre typer elementer og andre beregningsverktøy.

Ved produksjon av rakettmotorer i kompositt knytter det seg også en del usikkerhetsmomenter til de ulike stegene og prosessene i selve produksjonen. Viklemetode (våtvikling eller prepreg-vikling), fiberstrekk og herdetemperatur er bare noen av de mange parameterne som vil påvirke sluttresultatet. Disse parametrene er ikke uavhengige, noe som gjør det vanskelig å finne en optimal kombinasjon. Dette er også momenter som vanskelig lar

seg simulere, ergo må analyseres ved produksjon og eksperimentell testing. Trykktesting er i denne sammenhengen en sentral og viktig oppgave for økt forståelse av rakettmotorene. En trykktesting av den sylindriske trykkflaskegeometrien gir blant annet et mål på radiell og aksiell utvidelse under gitt trykk, samt hvor mye flasken tåler før brudd oppstår.

Bruddmønsteret etter at flasken er sprengt kan også gi en indikasjon på hvor det svake punktet i konstruksjonen er. Dersom ikke ønsket sprengtrykk er oppnådd, må man tilbake til elementanalysen, men nå utstyrt med kunnskap om hvor det svake punktet er. På grunn av alle de usikre parametrene er dette en lang prosess med mye testing.

1.2 Spesifisering av oppgaven

Oppgaven går ut på å etablere analyseverktøy (datamodeller) for analyse av 4-toms testflasker i kompositt. Hovedvekten av arbeidet vil bestå i å fremskaffe gode materialparametre og å anvende disse i analyser, for deretter å sammenlikne beregningene med eksperimentelle tester av 4-toms trykkflasker. Arbeidet vil på den måten både være teoretisk og praktisk rettet.

Det tas utgangspunkt i FFI/Nammo sitt ”standard” materialsystem, men andre materialsystemer bør også tas med i vurderingen og inkluderes i modeller, tester og øvrige prosesser og prosedyrer som inngår.

Følgende temaer bør inkluderes i oppgaven:

- Beskrivelse av rakettmotorens oppbygning og virkemåte
- Generell beskrivelse av komposittmaterialer og laminatteori
- Lagoppbygning og fiberorientering for viklede sylindriske konstruksjoner - trykkflasker
- Generell beskrivelse av analyseverktøy, elementmetodeberegninger og valgt beregningsmodell, produksjonsteknikk, materialtester og øvrige eksperimentelle tester
- Vurdering av laster, krefter og fastholdningspunkter – spesielt for analysemodell
- Produksjonsmessige påvirkninger på konstruksjonen; forspenning, kompakteringstrykk, herdesyklus, type mandrell, geometrikrav i produksjon av 4-toms trykkflasker med kombinasjon av enderinger i metall og sylindrisk del i kompositt
- Bruddmekaniske vurderinger
- Statisk elementmetodeanalyse av 4-toms testflaske
- Trykktest av konstruksjonen (”hydro burst test”)
- Vurdering av skalerbarhet og overføring av modeller og prosedyrer til fullskala rakettmotorer i kompositt
- Testmetoder

- Modellering
- Geometrier
- Innfesting av metallenderinger (geodesisk kontra ikke-geodesisk form)
- Oppgaveskriving/rapportering

1.3 Organisering av oppgaven

Oppgaven er delt inn i 7 kapitler. Det første kapitlet viser disposisjon av oppgaven og sier litt om motivasjonen for prosjektet. Oppgaven blir i tillegg avgrenset og spesifisert. Kapittel 2 tar for seg teoridelen, med en innføring i laminatteori og materialteknologi for kompositter. Det blir også vist hvordan man etablerer stivhetsmatrisen til et lag og et laminat. Kapittel 3 gir en rask innføring i hvordan en rakettmotor er bygd opp og fungerer, samt de matematiske prinsippene bak dette. Kapittel 4 omhandler 4-toms testflaskene som blir benyttet ved FFI. En får vite litt om produksjon og om hvilke faktorer som påvirker det ferdige produktet. Kapittel 5 tar for seg simuleringsdelen, med en kort presentasjon av analyseprogrammene, samt en gjennomgang av geometrien til sylindren og 4-tomsflasken. Komposittlementene vil bli sammenliknet opp mot kontinuumselementer, analytiske bergninger og annen programvare. I kapittel 6 inneholder alle resultatene, både fra simulering og fysiske tester. I kapittel 7 blir oppgaven oppsummert og en konklusjon presentert, sammen med forslag til videre arbeid.

2 Komposittmaterialer og laminatteori

Komposittmaterialer kan defineres som materialer bestående av to eller flere komponenter, der hver komponent er tydelig definert. Ved å sette sammen ulike komponenter, det vil si ulike materialer, kan man utnytte de enkelte materialenes egenskaper på en bedre måte. Egenskapene til komposittmaterialer er generelt retningsavhengige, og kompositter betegnes normalt som anisotrope materialer. Ulike materialegenskaper i ulike retninger gjør det relativt komplisert å bestemme materialparametre for kompositter og slike materials egenskaper.

Komposittmaterialer har vært i bruk siden egypterne armerte leire med siv for 3000 år siden. I dag armeres betong med jern, men det har også blitt utviklet en rekke andre komposittmaterialer og produkter med mye høyere styrke/vektforhold. En blanding av fiber og plast er en kombinasjon som ofte gir høy styrke og stivhet i forhold til vekt, og er i tillegg enkel å forme til komplekse geometrier. Denne typen materialer var lenge forbeholdt fly- og romfartsindustrien, men det har etter hvert spredt seg til blant annet bilindustrien og en del andre produkter (som for eksempel sportsutstyr). Komposittmaterialer spesialdesignes ofte for sitt formål ved at en bygger materialet lagvis og alternerer *fiberorienteringen* etter behov.

I dette kapittelet skal vi se litt på forskjellige komposittmaterialer og hvordan man bygger opp og analyserer et komposittmateriale.

2.1 Komposittmaterialer

Fiberarmerte plastkompositter kan armeres med lange kontinuerlige fibre, korte fibre eller partikler. Det finnes en rekke forskjellige fibre som for eksempel karbonfiber, glassfiber og aramidfiber (Kevlar). De mest vanlige plastmaterialene som benyttes i denne typen kompositter er polyester, vinylester og epoksy. Fibrene tar i hovedsak opp kreftene, mens matrisen binder fibrene sammen og overfører laster mellom dem. Plaststoffene kan deles inn i *herdeplaster* (for eksempel polyester, epoksy, vinylester) og *termoplaster* (for eksempel polyetylen, polypropylen). Ved å varme opp en herdeplast til flytende tilstand, vil den ved avkjøling til fast stoff igjen ikke få tilbake de egenskapene den hadde før oppvarmingen. Termoplast kan derimot varmes opp og avkjøles flere ganger uten at egenskapene endres permanent.

I denne oppgaven blir det fokusert på karbonfiber og epoksy da det er disse materialene som brukes i trykkflaskene som blir produsert ved FFI.

Karbonfiber

Karbonfiber er mye brukt i komposittmaterialer som følge av høy styrke og stivhet pr. vektenhet. Karbonfiber med et karboninnhold på mer en 99 prosent kalles grafitfiber; det er varmebehandlingen som avgjør karboninnholdet. Bruken av karbonfiber økte betraktelig på 90-tallet på grunn av økt tilgjengelighet og sterkt reduserte priser.

Det er de sterke båndene mellom karbonatomene som gir materialet dets høy styrke og stivhet. Karbonfiber utvinnes fra enten rayon (viskosefibrer), pitch eller polyacrylonitrile (PAN). PAN er billig å produsere, pitch gir høy stivhet og varmeledningsevne, mens rayon gir lav varmeledningsevne. Karbonfiber utvunnet av PAN er den mest benyttede formen, hovedsaklig på grunn av pris. PAN-basert karbonfiber anvendes mye i militære fly, missiler og romfartskonstruksjoner. Pitch-basert karbonfiber brukes i satellitter på grunn av den høye stivheten. Karbonfiber av rayon benyttes i konstruksjoner som blir utsatt for høy varme som for eksempel endestykket på raketter. I tabell 1 ser vi de forskjellige materialenes egenskaper.

Karbonfiber er tilgjengelig i mange forskjellige former; korte fibre, kontinuerlige fibre eller vevde matter er bare noen av variantene. Vanligst er det med kontinuerlige fibre i bunter. Disse buntene består normalt av 400 – 10 000 tråder, men er tilgjengelige med helt opp til 160 000 tråder.

Tabell 1, Materialeegenskaper for karbonfiber

Egenskaper, enhet	PAN	Pitch	Rayon
Strekksstyrke, MPa	1925 – 6200	2275 – 4060	2070 – 2760
E-Modul, GPa	230 - 595	170 – 980	415 – 550
Tetthet, g/cm ³	1,77 – 1,96	2,0 – 2,2	1,7
Forlengelse, %	0,4 – 1,2	0,25 – 0,70	-
Varmeledningsevne, W/mK	20 – 80	400 – 1100	-
Fiberdiameter, µm	5 – 8	10 – 11	6,5

Epoksy

Epoksy (kunstharpiks) er en gjennomsiktig herdeplast som brukes blant annet som lim og bindemateriale i fiberarmerte komposittmaterialer. Den vanligste metoden for å fremstille epoksy er ved reaksjonen mellom klorohydrin og bisphenol-A. Reaksjonen tilsettes kjemikalier som reagerer med epoksygruppene og lager kryssbindinger. Epoksy er i utgangspunktet flytende, men molekylene vil polymerisere når det utsettes for varme. Dette vil si at enkle molekyler ved en kjemisk reaksjon danner tredimensjonale nettverk.

Viskositeten bestemmes av i hvilken grad epoksyen har blitt polymerisert.

Epoksy er mye brukt sammen med glass- og karbonfiber på grunn av den gode festeevnen og motstandsdyktigheten mot varme, vann og kjemikalier. Epoksy har i tillegg høy isolasjonsevne og elektrisk motstand. Materialeegenskaper for epoksy ser vi i tabell 2.

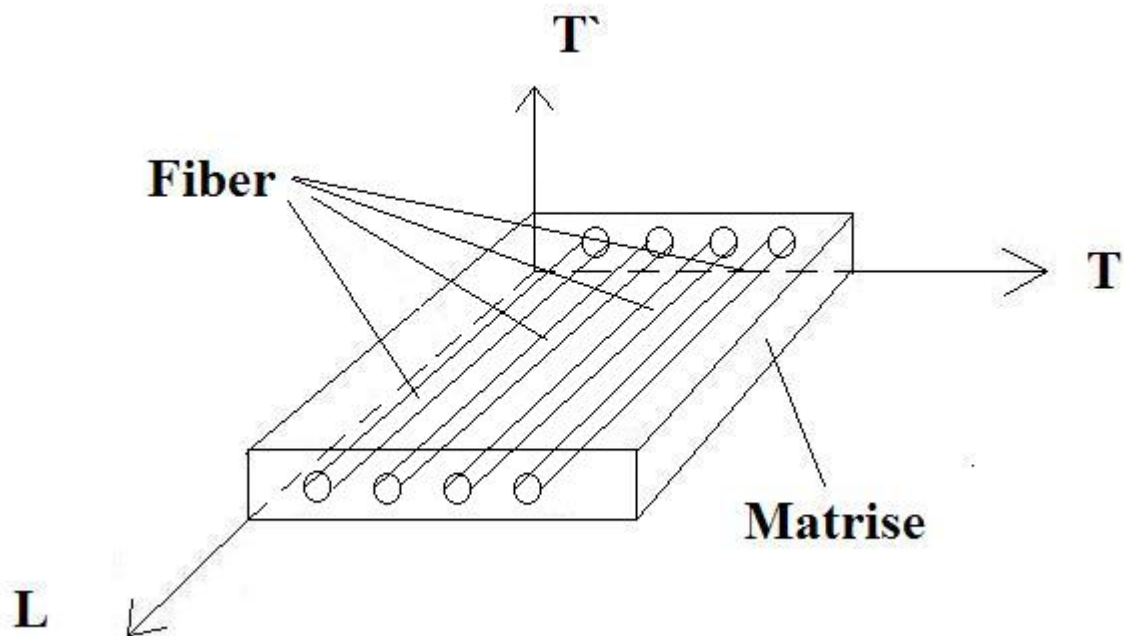
Tabell 2, Materialeegenskaper for epoksy

Egenskaper, enhet	Epoksy
Tetthet, g/cm ³	1,2 – 1,3
Strekkfasthet, MPa	55 – 130
E-Modul, GPa	2,75 – 4,10
Varmeutvidelse, 10 ⁻⁶ /°C	45 - 65
Vanninntrengning på 24 timer, %	0,08 – 0,15

2.2 Fiberorientering

Fiberorienteringen er helt avgjørende for egenskapene til kompositter med kontinuerlige fibre. Matrisen er et isotropt materiale og har like egenskaper i alle retninger, men fibre tåler betraktelig mer langs sin egen akse (L, se figur 1) enn på tvers (T og T', se figur 1). En blanding av epoksy og grafittfiber med 63 prosent fiberinnhold har en strekkstyrke på 1725 MPa i fiberretningen mot 42 MPa på tvers av fiberretningen (ca. 2,4 %). Blandingen av epoksy og grafittfiber tåler ca. 41 ganger mer strekk i fiberretningen enn på tvers av fiberretningen. Dette er på grunn av at strekkstyrken og stivheten er mye høyere hos fiberen

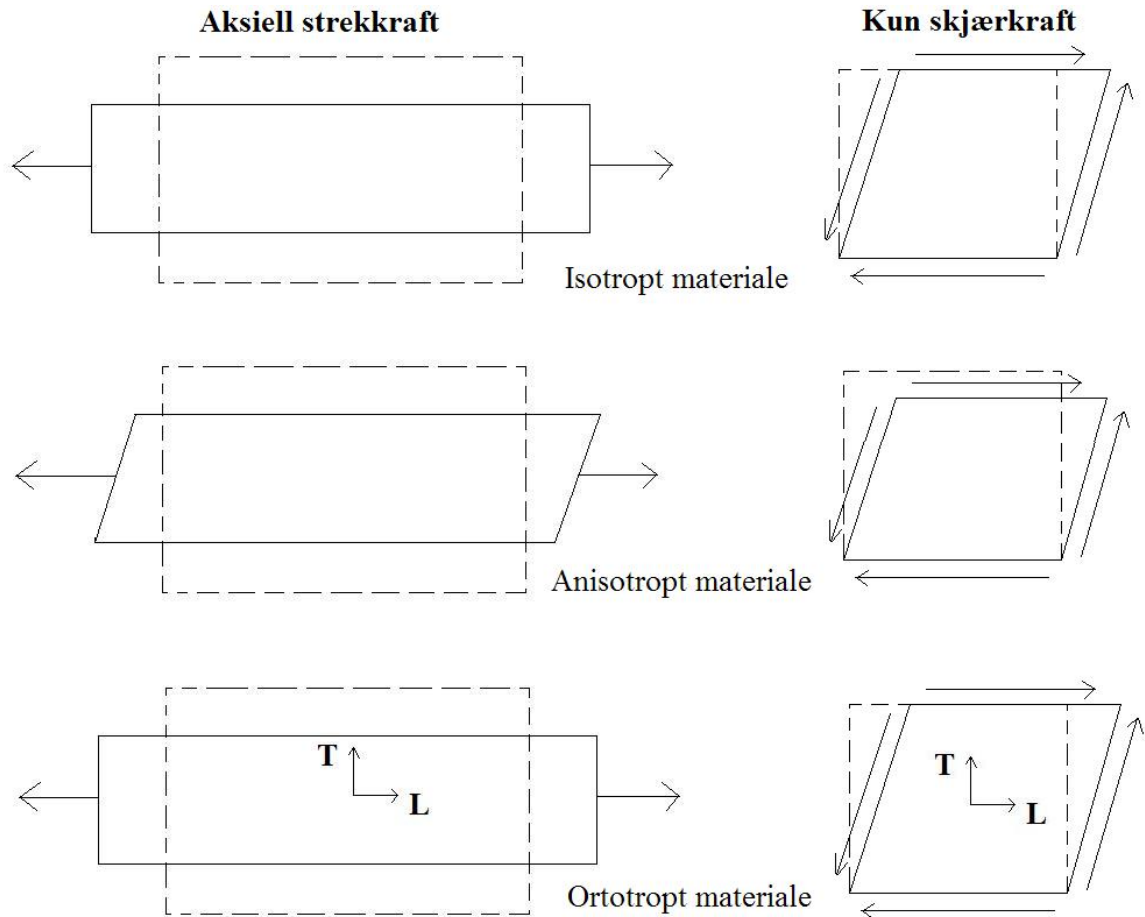
enn hos matrisen. En ønsker derfor å legge opp fibrene etter hvordan konstruksjonen vil belastes. Dette kan man gjøre ved å bygge opp komposittet av flere lag med ulik orientering, dette vil vi gå nærmere inn på senere i kapittelet.



Figur 1, Lag med retninger

2.3 Ortotrope materialer

Innenfor mekanikken faller kompositter under kategorien ortotrope materialer da egenskapene ligger mellom de for isotrope og de for anisotrope materialer. Forskjellen kan vises gjennom de ulike materialenes reaksjon på strekk- og skjærkrefter (se figur 2).



Figur 2, Deformasjon av isotropt, anisotropt og ortotropt materiale

Hvis man belaster et isotropt materiale med en aksiell strekkraft, vil materialet forlenge seg i belastningsretningen og krympe i tverretningen, mens vinklene til de motstående sidene forblir uendret. En ren skjærkraft vil endre vinklene, men avstanden mellom de parallelle sidene vil ikke endres. Hvis lastretningen endres, vil materialet oppføre seg identisk - i forhold til den nye retningen. Like laster i forskjellige retninger vil gi like endringer i lengder og vinkler. Isotrope materialer er retningsuavhengige.

Et anisotropt materiale som blir utsatt for en aksiell strekkraft, vil også forlenge seg i strekkretningen og krympe i tverretningen, men i tillegg vil vinklene endre seg. Ved påføring av skjærkrefter vil avstanden mellom de motstående sidene endre seg i tillegg til vinklene. Like laster i forskjellige retninger vil gi ulike endringer i lengder og krefter. Anisotrope materialer er derfor retningsavhengige.

Deformasjonsmønsteret til ortotrope og anisotrope materialer er generelt relativt likt. Det vil si at de er retningsavhengige, og at de reagerer likt på normalspenninger og skjærspenninger.

Derimot i noen tilfeller der lastene er påført i bestemte retninger, vil ortotrope materialer oppføre seg omtrent som om de er isotrope. Det vil si at normalspenninger kun gir normaltøyninger og skjærspanninger kun gir skjærtøyninger. Disse retningene kalles symmetriaksene. I et ensrettet fiberkompositt er disse retningene på langs og tvers av fibre.

Et tredimensjonalt ortotropt materiale har tre symmetriakser som står vinkelrett på hverandre. Et ensrettet kompositt er ortotropt, men i tillegg til de tre nevnte symmetriaksene er alle retningene vinkelrett på fiberretningen også symmetriakser. På grunn av dette beskrives ofte ensrettede kompositter som transvers isotrope.

Når referanseaksene (x og y) stemmer overens med et lags symmetriakser, kalles dette et spesielt ortotropt lag. Når disse aksene ikke stemmer overens kalles dette et generelt ortotropt lag.

2.4 Lagoppbygning

På grunn av at fiberen har mye høyere styrke og stivhet enn matrisen, blir orienteringen og lagoppbygningen helt avgjørende for hele komposittets egenskaper. Derfor er det også vanlig å bygge opp et kompositt av flere *lag*, dette kalles et *laminat*. Egenskapene til fiberkompositter kan i hovedsak endres ved å justere på tre faktorer; fiberretninger, fiberinnhold og lagtykkelse.

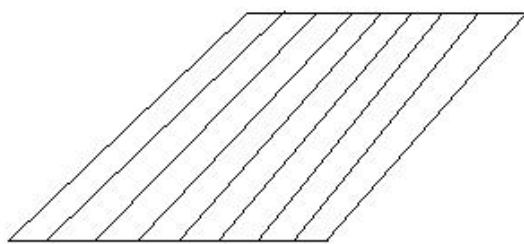
Lag

Et lag består av fibre i en retning (ensrettede) eller i to retninger (for eksempel vevede stoffer). Et lag har gjerne ortotrope eller transvers isotrope materialegenskaper. For å relatere et lags spenninger og tøyninger i planet trengs de fire uavhengige ingeniørkonstantene E_L , E_T , G_{LT} og ν_{LT} , hvor de henholdsvis er E-modul i fiberretningen, E-modul på tvers av fiberretningen, skjærmodulen og store tverrkontraksjonstall. Store tverrkontraksjonstall gir tøyninger på tvers av fiberretningen forårsaket av spenninger i fiberretningen.

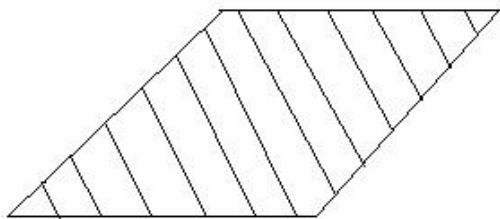
Når referanseaksene (x og y) stemmer overens med et lags symmetriakser (L og T), kalles dette et spesielt ortotropt lag. Når disse aksene ikke stemmer overens, kalles dette et generelt ortotropt lag og vi har da en vinkel θ mellom disse.

Laminat

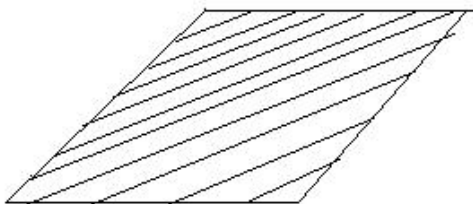
Fiberarmert plast er et anisotropt materiale med betydelig forskjellige egenskaper i fiberretningen i forhold til på tvers av fiberretningen. Derfor er det vanlig å bygge opp et kompositt av lag med forskjellig fiberorientering. Dette gir bedre styrke og stivhet i flere retninger. Fiberlagene blir derfor plassert etter det formålet som skal oppnås for det gitte laminatet, enten det er retningen på fibrene eller hvor i laminatet fiberlaget skal ligge. Laminatet settes sammen av flere lag for ønskede egenskaper og tykkelse. Se figur 3 for eksempel på lagoppbygning.



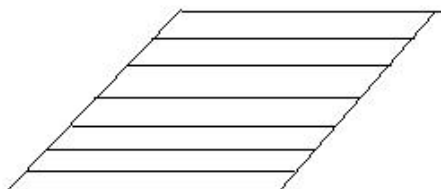
Lag 1: 0°



Lag 2: 45°



Lag 3: -45°



Lag 4: 90°

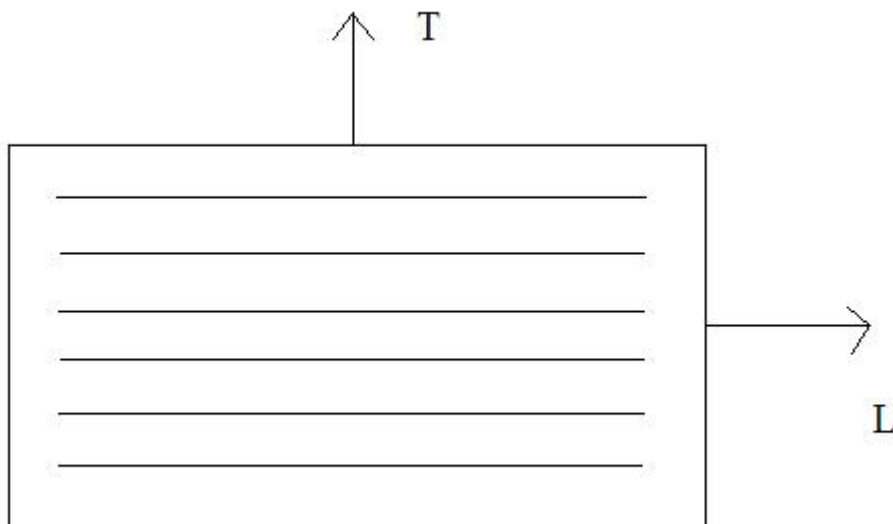
Figur 3, Eksempel på laminat med fire lag

2.5 Beregning av stivhetsmatrise

Beregning av stivhetsmatrisene til komposittmaterialer er ingen enkel oppgave. Vi ser derfor først på stivhetsrelasjonene til et enkelt ortotropt lag, belastet i fiberretningen, på tvers av fiberretningen og ved hjelp av skjærspenninger. Deretter vil vi beregne stivhetsmatrise for et laminat. Vi vil også se på hvordan man kan beregne tøyninger og spenninger i et enkelt lag når vi har et belastet laminat.

2.5.1 Beregning av egenskapene til et lag

For å kunne beregne stivhetsmatrisen til et ortotropt lag (se figur 4) må vi relatere spenninger og tøyninger til hverandre. I tillegg må vi finne uttrykk for skjær.



Figur 4, Spesielt ortotropt lag

Vi ser først på belastning kun i fiberretningen. Hvis laget belastes med spenningen σ_L , blir lengdetøyningen

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{E_L} \quad (1)$$

Der E_L er lagets stivhetsmodul i lengderetningen. For å finne tøyningen på tvers av fiberretningen kan vi benytte oss av ligning (1). Vi multipliserer tverrkontraksjonstallet ν_{LT}

(også kalt store tverrkontraksjon), som sier noe om forholdet mellom tøyning på langs og tvers av fiberretningen, med ligning (1).

$$\varepsilon_T = -\nu_{LT} \varepsilon_L = -\nu_{LT} \frac{\sigma_L}{E_L} \quad (2)$$

Skjærtøyningene (γ_{LT}) er 0, da det som nevnt kun er belastning i fiberretningen

$$\gamma_{LT} = 0 \quad (3)$$

Vi ser nå på belastning på tvers av fiberretningen. Vi får da dette uttrykket for tøyning på tvers av fiberretningen ved å dividere spenning med stivhet. Hvor σ_T er spenning på tvers av fiberretningen og E_T er E-modulen på tvers av fiberretningen.

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E_T} \quad (4)$$

Og dette uttrykket for spenning i fiberretningen, hvor ν_{TL} er tverrkontraksjonen på tvers av fiberretningen (også kalt lille tverrkontraksjonstall).

$$\varepsilon_L = -\nu_{TL} \varepsilon_T = -\nu_{TL} \frac{\sigma_T}{E_T} \quad (5)$$

Skjærtøyningene er 0

$$\gamma_{LT} = 0 \quad (6)$$

I det siste tilfellet ser vi på skjærspenninger. Tøyningen i fiberretningen og på tvers av fiberretningen er 0

$$\varepsilon_L = 0 \quad (7)$$

$$\varepsilon_T = 0 \quad (8)$$

Skjærtøyningene er skjærspenningene (τ_{LT}) dividert med skjærmodulen (G_{LT})

$$\gamma_{LT} = \frac{\tau_{LT}}{G_{LT}} \quad (9)$$

Ved å superponere uttrykkene fra de 3 tilstandene får vi et generelt forhold mellom tøyninger og spenninger for et spesielt ortotropt materiale.

Vi får dette uttrykket for tøyning i fiberretningen

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{E_L} - \nu_{TL} \frac{\sigma_T}{E_T} \quad (10)$$

Og dette uttrykket for tøyning på tvers av fiberretningen

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E_T} - \nu_{LT} \frac{\sigma_L}{E_L} \quad (11)$$

Og dette uttrykket for skjærtøyningene

$$\gamma_{LT} = \frac{\tau_{LT}}{G_{LT}} \quad (12)$$

For å beskrive et anisotropt elastisk materiale trenger man 21 uavhengige materialkonstanter.

På grunn av symmetriegenskaper kan man beskrive et ortotropt materiale ved hjelp av 9 uavhengige konstanter. Vi har denne sammenhengen mellom tøyninger og spenninger der aksene 1, 2 og 3 representerer henholdsvis L, T og T'

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Matrisen med S kalles for fleksibilitetsmatrisen, mens den inverse matrisen Q kalles stivhetsmatrisen. Hvis vi ser på en todimensjonal modell, kan vi fjerne alle ledd som inneholder indeks 3. Da får vi

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (15)$$

S-verdiene er gitt ved

$$S_{11} = \frac{1}{E_L} \quad (16)$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_T} \quad (17)$$

$$S_{12} = -\frac{\nu_{LT}}{E_L} = -\frac{\nu_{TL}}{E_T} \quad (18)$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_{LT}} \quad (19)$$

Overgangen til Q-verdien er gjengitt i [1]

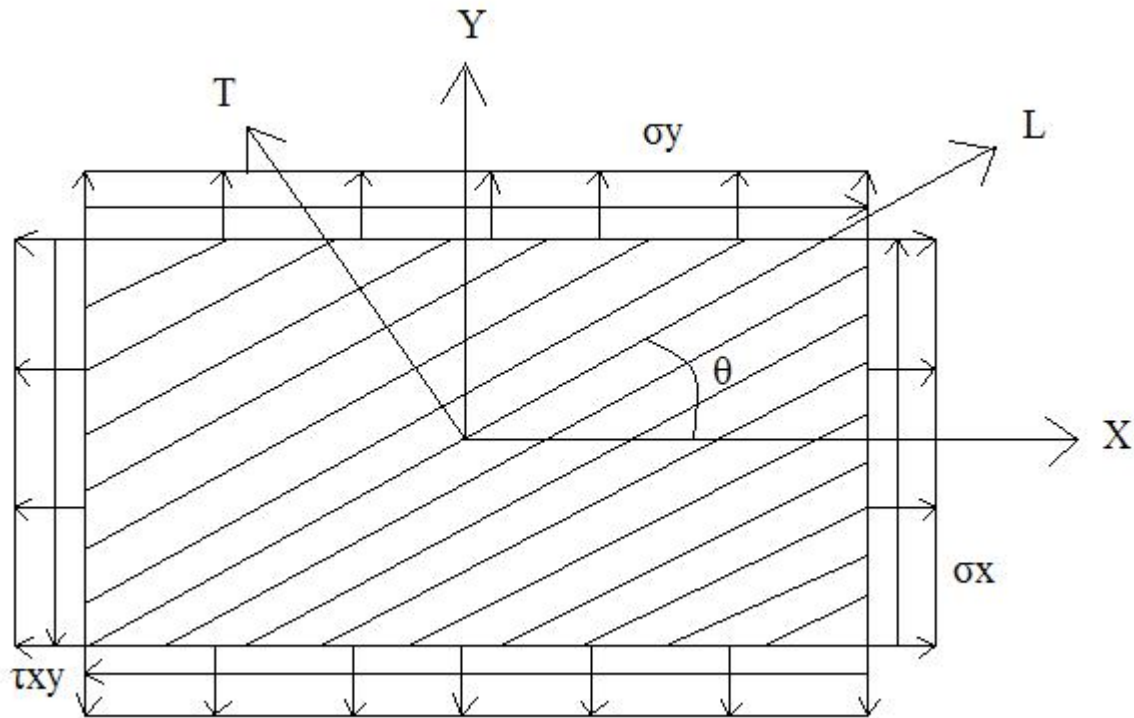
$$Q_{11} = \frac{E_L}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} \quad (20)$$

$$Q_{22} = \frac{E_T}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} \quad (21)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{LT}E_L}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} = \frac{\nu_{TL}E_L}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} \quad (22)$$

$$Q_{66} = G_{LT} \quad (23)$$

Hvis vi ser på et generelt ortotroppt materiale, er vinklene L-T rotert med en vinkel θ i forhold til x-y aksene (se figur 5).



Figur 5, Generelt ortotroppt lag

For å relatere spenningen i de lokale aksene (L og T) til de globale aksene (x og y) må vi innføre en transformasjonsmatrise $[T]$ som er gjengitt i ligning (26)

$$\begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Det samme gjelder for tøyningene

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \frac{1}{2}\gamma_{LT} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Hvor $[T]$ er transformasjonsmatrisen

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \cos \theta \sin \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \cos \theta \sin \theta \\ -\sin^2 \theta \cos^2 \theta & \sin^2 \theta \cos^2 \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (26)$$

Vi kan da skrive stivhetsmatrisene [1]

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 2Q_{66} \end{bmatrix} [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2} \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (27)$$

Og

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Eller med fleksibilitetsmatrisen [1]

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \frac{1}{2} \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} S_{66} \end{bmatrix} [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (29)$$

Og

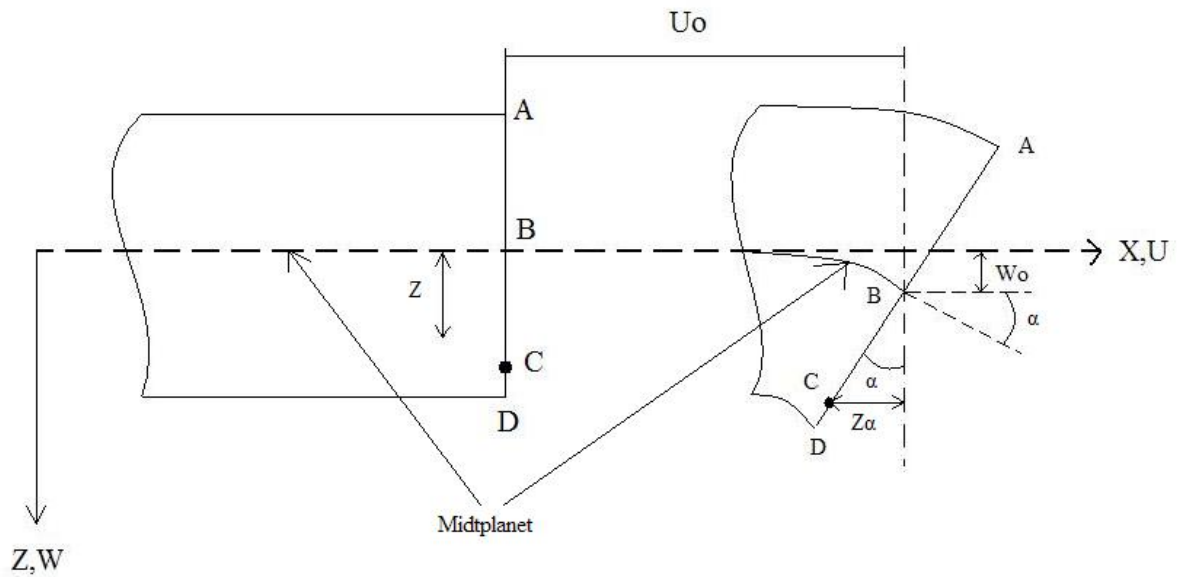
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (30)$$

2.5.2 Beregning av egenskapene til et laminat

Fram til nå har vi sett på egenskapene til et lag. I den neste delen vil vi ta med oss kunnskapene om et lag for å beregne stivhetsmatrisen til et laminat.

Tøyninger I laminatet

Vi tar utgangspunkt i en del av et tilfeldig laminat (se figur 6) og ser på xz-planet. Vi forutsetter at linja ABCD forblir normal på midtplanet i deformert form. Med denne antagelsen ser vi bort fra skjærdeformasjoner. Forskyvningen u i x-retningen er definert langs midtplanet og deformasjonen w i z-retningen er definert normalt på midtplanet.



Figur 6, Deformasjon av en del av et laminat utsatt for bøyning

Som nevnt forutsetter vi at skjærdeformasjonene er lik 0

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zx} = 0 \quad (31)$$

Forskyvningen u i x-retningen til punkt C er gitt ved, hvor α er vinkelen mellom udeformert og deformert midtplan

$$u = u_0 - z\alpha \quad (32)$$

Hvor vinkelendringen er gitt ved

$$\alpha = \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (33)$$

Ved å kombinere likning (32) og (33) får vi forskyvningen u i x-retningen for et tilfeldig valgt punkt med en distanse z fra midtplanet.

$$u = u_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (34)$$

Tilsvarende for y-retningen

$$v = v_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial y} \quad (35)$$

Uttrykket for forskyvningen w i z -retning er w_0 + lengdeøkningen av linja ABCD, men lengdeøkningen av ABCD regnes for å være ubetydelig i forhold til w_0 . Vi kan derfor se bort fra denne lengdeøkningen og si at alle forskyvninger i z -retning er lik w_0 . Dette gir normaltøyninger ε_z lik 0. Ved å derivere uttrykket for forskyvningene får vi disse tøyningene i laminatet.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \quad (36)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \quad (37)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \quad (38)$$

Ved hjelp av midtplanstøyninger og krumning, uttrykker vi spennings-tøyningsrelasjonen på denne måten [5]:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (39)$$

Hvor midtplanstøyningene er

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (40)$$

Og krumningene er

$$\begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (41)$$

Spenninger i laminatet

Tøyningene varierer gjennom laminatet. Disse kan finnes hvor som helst i laminatet ved hjelp av likning (40). Vi forutsetter at hosliggende lag ikke kan gli over hverandre og kan derfor si at tøyningene varierer lineært gjennom laminatets tykkelse selv om det består av lag med forskjellige orienteringer. Lineære tøyninger vil gi lineære spenninger gjennom tykkelsen så lenge de elastiske egenskapene er like. Det vil de være innenfor ett lag, men ikke gjennom hele laminatet hvis det består av lag med ulik orientering. Derfor vil spenningsene være lineære over tykkelsen til et lag, men sammensatt av mange lineære segmenter over hele laminatet.

Spenningsene i et tilfeldig punkt k i et lag har vi fra [1], hvor $[\bar{Q}]$ er lagets stivhetsmatrise

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (42)$$

eller

$$\{\sigma\} = [\bar{Q}]_k \{\varepsilon^0 + zk\} \quad (43)$$

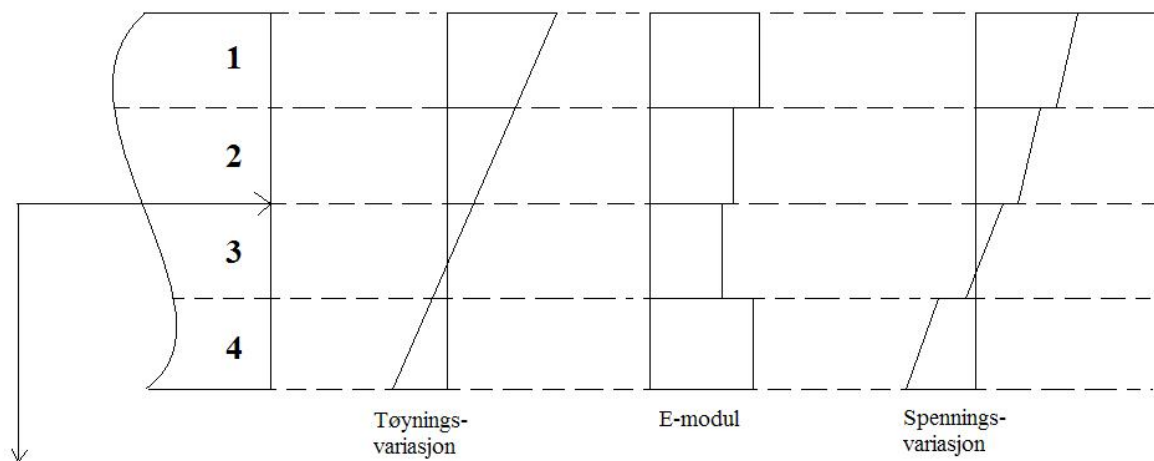
Der stivhetsmatrisen har leddene, hvor θ er lagets rotasjon i forhold til de globale aksene

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11} \cos^4 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11} \sin^4 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + Q_{12} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \cos^2 \theta + \sin^2 \theta + Q_{66} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos^3 \theta \sin \theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos^3 \theta \sin \theta \end{aligned} \quad (44)$$

Q-verdiene får vi ut i fra 5 ingeniørkonstanter basert på E-modul og tverrkontraksjoner. E_L og E_T er tverrkontraksjonen i henholdsvis fiberretning og på tvers av fiberretningen. ν_{LT} og ν_{TL} er henholdsvis store og lille tverrkontraksjon.

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_L}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} \\ Q_{22} &= \frac{E_T}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} \\ Q_{12} &= \frac{\nu_{LT}E_L}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} = \frac{\nu_{TL}E_L}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} \\ Q_{66} &= G_{LT} \end{aligned} \quad (45)$$

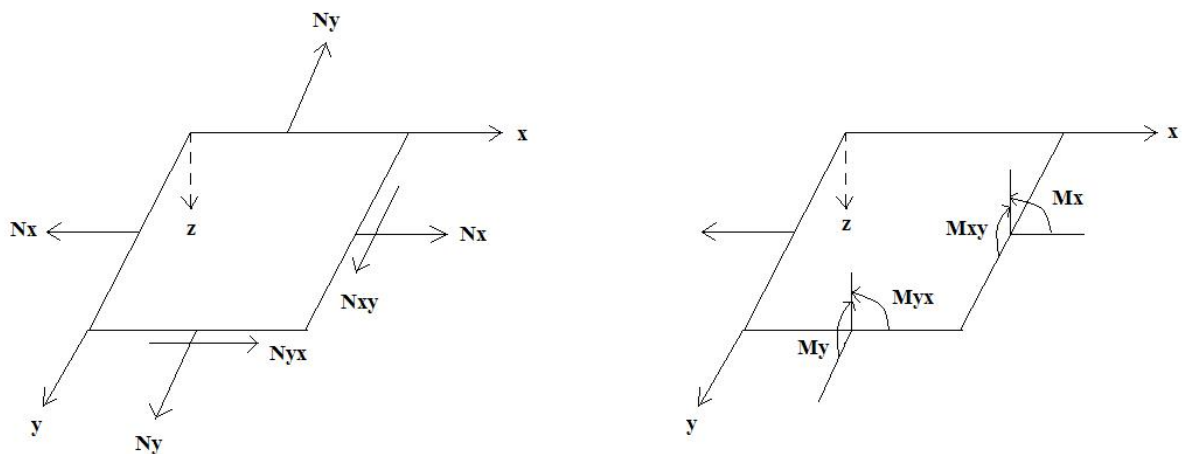
Tøyningen er som nevnt, lineær gjennom hele laminatets tykkelse. E-modulen er en konstant og varierer fra lag til lag. Dette gir oss en spenningsvariasjon gjennom tykkelsen til laminatet, som består av diskontinuerlige lineære linjer. Tøyning og spenningsvariasjoner over et 4-lags laminat er gitt i figur 7.



Figur 7, Tøyning og spenningsvariasjon

Normalkrefter og momenter i laminatet

I et laminat er det som nevnt ulike spenninger i de forskjellige lagene. For å gjøre det litt enklere ser man på hele laminatet. Et tverrsnitt med krefter og momenter vises i figur 8. Den totale tykkelsen til laminatet er gitt ved h .



Figur 8, Normalkrefter og momenter

Vi får normalkreftene N_x , N_y og N_{xy} ved å integrere spenningene over tykkelsen h

$$N_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x dz \quad (46)$$

$$N_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y dz \quad (47)$$

$$N_{xy} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{xy} dz \quad (48)$$

Momentene finnes ved å integrere spenningene over tykkelsen h og multiplisere dette med momentarmen over tykkelsen h

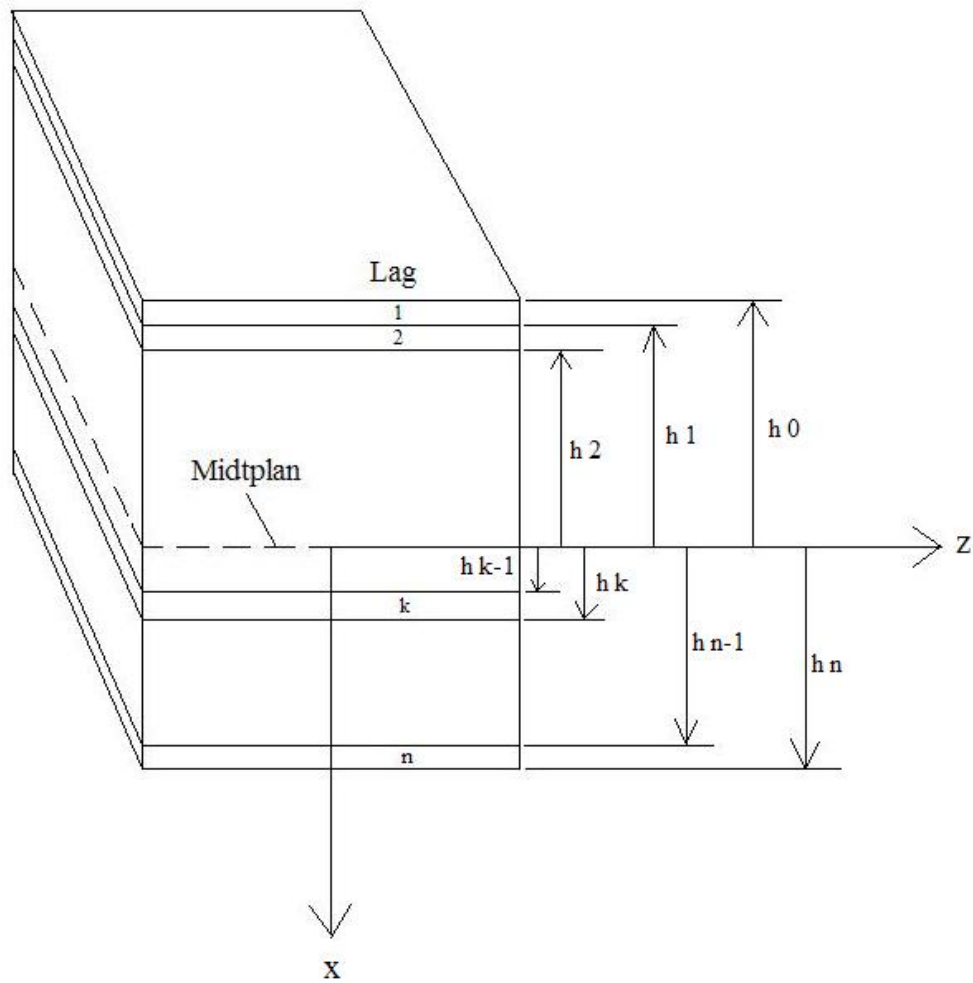
$$M_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x z dz \quad (49)$$

$$M_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y z dz \quad (50)$$

$$M_{xy} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{xy} z dz \quad (51)$$

I de neste ligningene har N_x , N_y og N_{xy} benevning kraftenhet per lengdeenhet, mens M_x , M_y og M_{xy} har benevning momentenhet per lengdeenhet. Vi har da et system som ikke inneholder laminattykkelse eller z -komponenten.

For å finne laminatets totale stivhetsmatrise må vi se på et laminat bestående av n ortotrope lag (se figur 9).



Figur 9, Lagoppbygning

Vi ser på summen av integralene som representerer bidraget fra hvert lag i laminatet og får disse normalkreftene

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} dz = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k dz \quad (52)$$

Og disse momentene

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k z dz \quad (53)$$

Spenningsene i ligning (52) og (53) kan skrives om og relateres direkte til midtplanstøyninger og krumninger [1]. Dette gir

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} z dz \quad (54)$$

Og

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} z dz + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} z^2 dz \quad (55)$$

Midtplanstøyninger og – krumninger forblir konstante innenfor et lag og over hele laminattykkelsen. Dette gjelder også for $[\bar{Q}]$ -matrisen som ikke varierer med z innenfor et lag. Derfor settes disse utenfor integrasjonstegnet

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left\{ \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz \right\} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \sum_{k=1}^n \left\{ \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right\} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (56)$$

og

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left\{ \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right\} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \sum_{k=1}^n \left\{ \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2 dz \right\} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (57)$$

Ved å introdusere A, B og D matrisene kan det skrives om til

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x^0 \\ \kappa_y^0 \\ \kappa_{xy}^0 \end{Bmatrix} \quad (58)$$

og

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x^0 \\ \kappa_y^0 \\ \kappa_{xy}^0 \end{Bmatrix} \quad (59)$$

hvor

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \quad (60)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (61)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (62)$$

Dette kan skrives som

$$\begin{pmatrix} N \\ M \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix} \quad (63)$$

De forskjellige matrisene kan relateres til forskjellige deler av stivheten. A-matrisen kalles aksialstivhetsmatrisen, og relaterer resultantkreftene til midtplanstøyninger. B-matrisen kalles en koblingsstivhetsmatrise, og angir kobling mellom forlengelse og bøyning.

Koblingsstivhetsmatrisen er normalt lik 0 ved symmetrisk oppbygning av laminatet. D-matrisen er en bøystivhetsmatrise, og relaterer krumningene til resultantmomentene.

For å forenkle analysen er det mulig å sette sammen et laminat slik at noen av leddene blir lik 0. Ved å gjøre dette kan vi også unngå uønskede koblinger mellom normalkrefter og skjærtøyninger eller mellom bøyning og strekk eller vridning. Hvis vi konstruerer laminatet symmetrisk om midtplanet blir koblingsstivhetsmatrisen B=0, noe som halverer analysen.

2.5.3 Spenningene og tøyningene i hvert lag

Det er viktig å finne ut spenningene i hvert lag da en lettere kan finne de svake punktene.

Hvis vi kjenner til oppbygningen av laminatet og belastningen det er utsatt for, kan vi finne spenningene og tøyningene i hvert av lagene.

Tøyningene i et lag forårsaket av eksterne laster er funksjoner av krumninger, midtplanstøyninger og avstand fra midtplanet i laminatet. Spenningene i et lag kan vi få fra de utregnede tøyningene i et lag ved å se på midtplanstøyningene og platekrumningene i ligning (42) eller ved spenning/tøyningsforholdet gitt i [1]. For å kunne få ut spenninger og tøyninger må vi først bestemme midtplanstøyninger og platekrumninger.

Ligning (58) og (59) gir oss forholdet mellom de nevnte midtplanstøyninger og platekrumninger, og påførte laster. Vi har da 6 ligninger og 6 ukjente, 3 midtplanstøyninger og 3 platekrumninger, som lar seg løse for de ukjente. Hvis B-matrise er ulik 0, blir vi nødt til å invertere en 6 x 6 matrise fra ligning (63) Denne prosessen kan deles opp slik at man inverterer mindre matriser og utfører matrisemultiplikasjoner.

I ligningene som følger er tøyningene og krumningene utledet som eksplisitte funksjoner av normalspenningene og momentene.

Fra likning (63) har vi denne relasjonen

$$\begin{pmatrix} N \\ M \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix} \quad (64)$$

Vi ser på likningene for N og M hver for seg

$$\{N\} = [A]\{\varepsilon^0\} + [B]\{\kappa\} \quad (65)$$

$$\{M\} = [B]\{\varepsilon^0\} + [D]\{\kappa\} \quad (66)$$

Løser uttrykket for N med hensyn på midtplanstøyninger

$$\{\varepsilon^0\} = [A^{-1}]\{N\} - [A^{-1}][B]\{\kappa\} \quad (67)$$

Setter ligning (67) inn i uttrykket for M

$$\{M\} = [B] \begin{bmatrix} A^{-1} \end{bmatrix} \{N\} - ([B] \begin{bmatrix} A^{-1} \end{bmatrix} [B] - [D]) \{\kappa\} \quad (68)$$

Ved å kombinere ligning (67) og (68) får vi en delvis invertert form av ligning (64)

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A^* & B^* \\ B^* & D^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ \kappa \end{Bmatrix} \quad (69)$$

Vi definerer A, B, C og D

$$[A^*] = \begin{bmatrix} A^{-1} \end{bmatrix} \quad (70)$$

$$[B^*] = - \begin{bmatrix} A^{-1} \end{bmatrix} [B] \quad (71)$$

$$[C^*] = [B] \begin{bmatrix} A^{-1} \end{bmatrix} = -[B^*]^T \quad (72)$$

$$[D^*] = [D] - [B] \begin{bmatrix} A^{-1} \end{bmatrix} [B] \quad (73)$$

For å oppnå den delvis integrerte formen av ligning (64) trenger vi kun å invertere en 3 x 3 matrise og utføre to matrisemultiplikasjoner.

Vi setter uttrykkene for A, B, C og D inn i ligning (67) og (68)

$$\{\varepsilon^0\} = [A^*] \{N\} + [B^*] \{\kappa\} \quad (74)$$

$$\{M\} = [C^*] \{N\} + [D^*] \{\kappa\} \quad (75)$$

Løser ligning (75) med hensyn på krumningen

$$\{\kappa\} = \begin{bmatrix} D^{*-1} \end{bmatrix} \{M\} - \begin{bmatrix} D^{*-1} \end{bmatrix} [C^*] \{N\} \quad (76)$$

Setter videre dette inn i ligning (74)

$$\{\varepsilon^0\} = ([A^*] - [B^*] \begin{bmatrix} D^{*-1} \end{bmatrix} [C^*]) \{N\} + [B^*] \begin{bmatrix} D^{*-1} \end{bmatrix} \{M\} \quad (77)$$

Forenkler

$$[A'] = [A^*] - [B^*][D^{*-1}][C^*] = [A^*] + [B^*][D^{*-1}][B^*]^T \quad (78)$$

$$[B'] = [B^*][D^{*-1}] \quad (79)$$

$$[C'] = -[D^{*-1}][C^*] = [B']^T = [B'] \quad (80)$$

$$[D'] = [D^{*-1}] \quad (81)$$

Har da den fullt ut inverterte konstitutive loven

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ B' & D' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \quad (82)$$

For symmetriske laminater kan vi uttrykke [1]

$$\{N\} = [A]\{\varepsilon^0\} \quad (83)$$

$$\{M\} = [D]\{\kappa\} \quad (84)$$

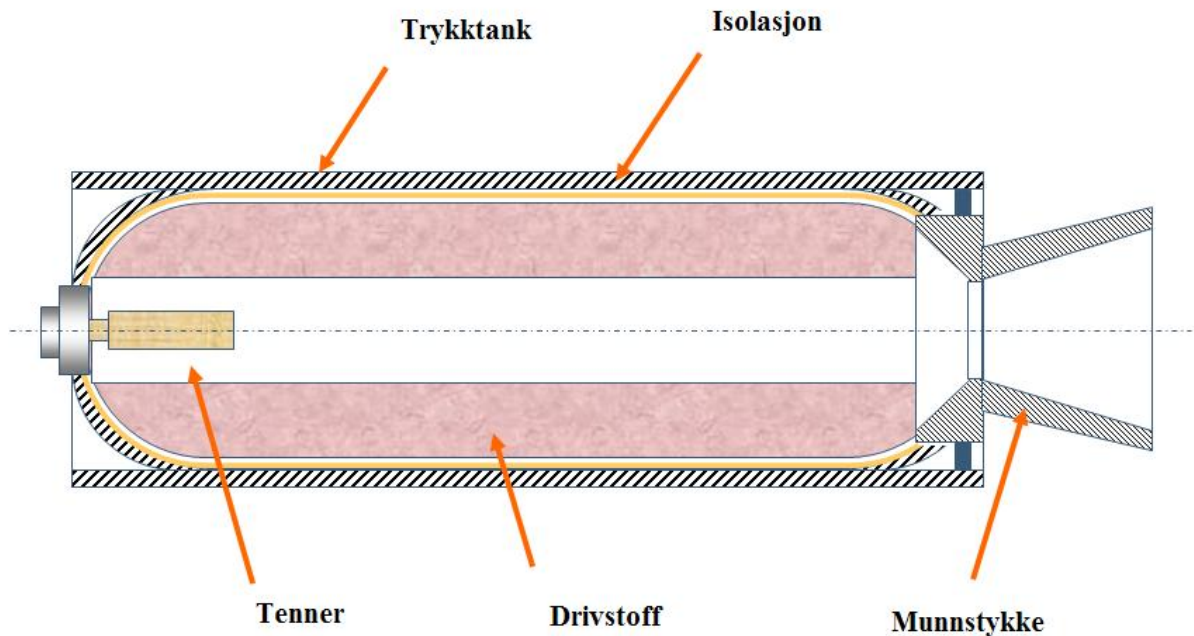
Både ligning (83) og (84) består av 3 ligninger med 3 ukjente. Disse løses ved henholdsvis å multiplisere med $[A^{-1}]$ og $[D^{-1}]$ på begge sider. Vi får da

$$\{\varepsilon^0\} = [A^{-1}]\{N\} \quad (85)$$

$$\{\kappa\} = [D^{-1}]\{M\} \quad (86)$$

Vi har nå et uttrykk for spenninger ved hjelp av den inverterte aksialstivhetsmatrisen og normalspenninger, Vi har også et uttrykk for krumningene ved hjelp av den inverterte bøyestivhetsmatrisen og momenter. For å finne spenningene må vi kjenne til normalspenningene som virker på laminatet og vi må kjenne til aksialstivhetsmatrisen. Da vil vi få spenningene i et lag orientert 0° i forhold til x-y planet. For å få spenningene til lag orientert annerledes, må vi bruke transformasjonsmatrisen.

3 Rakettmotor



Figur 10, Rakettmotor

En rakettmotor er i prinsippet en trykktank. Denne består av et skall av for eksempel stål eller karbonfiber, et munnstykke og isolasjon (se figur 10). Den inneholder drivstoff og en tenner.

Grunnlaget for framdriften til en rakettmotor er Newtons 2. lov, kraft er lik motkraft

I dette kapittelet vil vi gå gjennom hvordan en rakettmotor er bygd opp og hva som får den til å forflytte seg. Vi vil også diskutere hvilken relevans 4-tomsflasker har med tanke på analyse av en rakettmotor

3.1 Oppbygning og virkemåte

Rakettmotoren er en trykktank som er isolert på innsiden for å gjøre tanken helt tett.

Trykktankene som produseres ved FFI blir laget av karbonfiber/epoksy, en blanding som ikke er tett. Derfor isoleres trykktankene ved FFI med en 3 komponent polyuretan. Videre er det et munnstykke i bakenden av raketten hvor energien slippes ut.

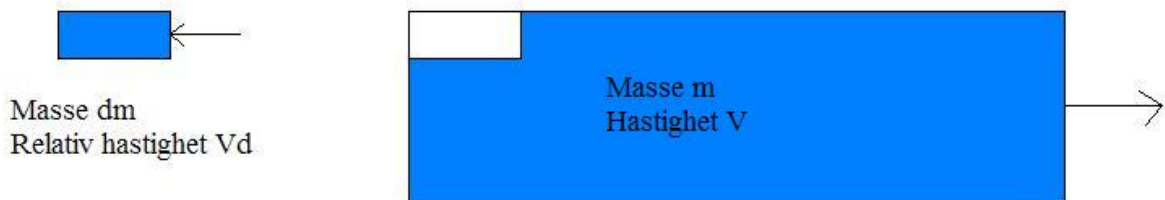
Trykktanken er fylt med enten et fast eller flytende drivstoff. Ved bruk av flytende drivstoff, oppbevares drivstoffet og oksideringsmaterialet i separate tanker. De blir pumpet ut i

endestykket der forbrenningen starter. I rakettmotorer med fast drivstoff, er drivstoffet og oksideringsmaterialet blandet sammen i en tank. Denne blandingen antennes først i kontakt med ekstern varme og vil brenne til alt drivstoffet er borte.

3.2 Prinsippet bak framdriften til en rakettmotor

En rakettmotor bygger på prinsippet om at kraft er lik motkraft (Newtons 2. lov). Det betyr at når man bruker en kraft for å akselerere en masse vil det gi like stor motkraft. Raketten driver seg selv fremover ved å kaste ut masse bakover. For å illustrere dette kan man tenke seg at en person står i en lett båt. Når personer begynner å gå fremover, vil båten bevege seg bakover. Jo større båten er i forhold til personen, desto mindre vil båten bevege seg bakover.

Hvis vi tenker oss en rakett fylt med trykkluft vil den ikke kunne fly veldig langt på grunn av at luften veier så lite. Hvis vi fyller tanken halvfull med vann, vil det være mye mer masse som flyttes bakover. Da vil raketten kunne nå mye lenger, selv om den veier mer. Vi kan da si at en rakett vil gå lenger desto større andel av sin egen masse den kan kaste ut bak. Derfor bør drivstoffet utgjøre den største vektandelen til en rakett, som igjen er en grunn til at vekten til selve komposittstrukturen må holdes nede.



Figur 11, Rakettprinsipp

Momentet p for en masse m og hastighet v er gitt ved

$$p = m \cdot v$$

Momentet vil være uforandret da vi forutsetter at det ikke er ytre krefter som påvirker massen.

$$dm \cdot Vd + m \cdot V = 0$$

Dermed vil den mindre delen (se figur 11) få en hastighet som er like mange ganger større som massen er mindre. Hvis for eksempel massen m_d er $1/10$ av massen m , vil V_d være 10 ganger større enn V . Full utledning av rakettligningen er gitt i [3].

3.3 Relevans av 4-tomsflaskeanalyser med tanke på analyse av rakettmotorer

Trykkflasker av karbonfiber er meget komplekse konstruksjoner, derfor vil to produserte enheter aldri bli identiske. En 4-tomsflaske vil aldri heller kunne gi et nøyaktig, men nedskalert bilde av egenskapene og oppførselen til en fullskala rakett. På den annen side så bygger 4-tomsflasken på akkurat de samme prinsippene og har en lik, men nedskalert geometri. Derfor kan vi si at den gir et godt nok bilde på oppførselen til en fullskala rakettmotor. 4-tomsflaskene er i tillegg raskere og billigere å produsere.

4 4-toms testflasker



Figur 12, 4-tomsflaske i kompositt

4-toms testflasker er utviklet ved FFI som analyseverktøy med tanke på fullskala rakettmotorer. Dette er flasker som har lik geometri, men som er mindre enn en fullskala rakettmotor. 4-tomsflaskene vikles i karbonfiber/epoksy og blir brukt til trykktesting for å innhente data om lengdeutvidelse, sprengtrykk osv.

I dette kapittelet vil jeg gå gjennom produksjonen av en slik flaske. Fra produsering av form, gjennom vikling av komposittmaterialet til herding av ferdig produkt. Testmetodene vil bli grundig gjennomgått og det blir diskutert hvilke faktorer under produksjonen som har påvirkning på egenskapene til det ferdige produkt.

4.1 Produksjon

Produksjon av testflasker i karbonfiberkompositt/epoksy består av i hovedsak 3 trinn. Ved FFI vikles karbonfiberen på en sylindrisk form med rett geometri. Denne formen kalles en mandrell og lages av et vannløselig stoff som kalles *Aquacore*. Når karbonfiberen er viklet rundt mandrellen, må denne herdes i en ovn for å oppnå god styrke og stivhet.

4.1.1 Aquacore-mandrell

For at testflaskene skal få en sylindrisk form må karbonfiberen vikles om en mandrell med rett geometri. De 4-toms trykkflaskene som produseres ved FFI, vikles på en mandrell laget av et produkt kalt Aquacore. Dette er en masse som er kornete ved romtemperatur, men som blir fast etter herding. Aquacoren er videre vannløselig, noe som gjør at den lett kan skylles ut av den ferdige komposittkonstruksjonen.

Mandrellen lages ved at man først plasserer et endestykke i metall, (se figur 16) i bunnen av en spesiallaget form (se figur 13 og 14). Endestykket blir en del av konstruksjonen etter at Aquacoren er skylt ut av det ferdige produktet. I endestykket er det skrudd fast et metallstag (se figur 17) som går gjennom hele mandrellen. Deretter fyller man opp med Aquacore (se figur 18) og komprimerer underveis for å unngå luftbobler. Når formen er fylt med Aquacore, fester man det andre endestykket (se figur 15) på toppen. Til slutt plasserer man hele formen i en varmeovn for herding.



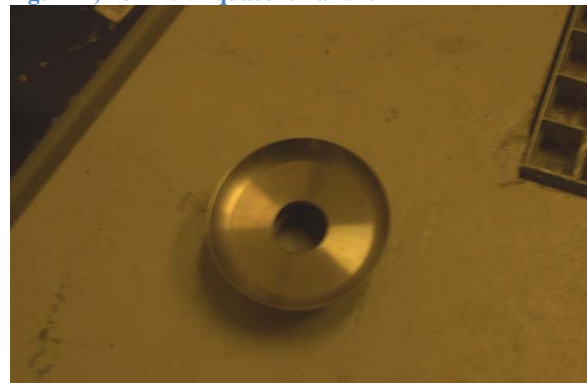
Figur 13, Form til Aquacoremandrell



Figur 14, Form til Aquacoremandrell



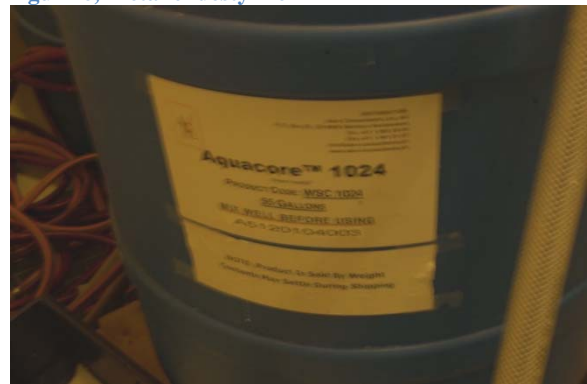
Figur 15, Metallendestykke



Figur 16, Metallendestykke



Figur 17, Metallstag

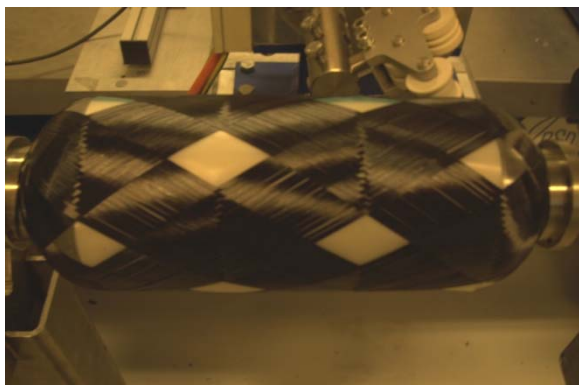


Figur 18, Aquacore

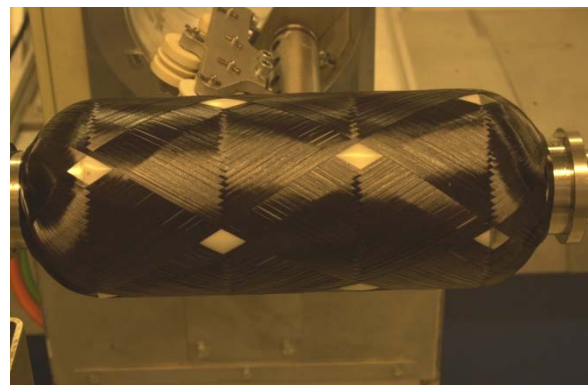
4.1.2 Vikling

Fiberen blir viklet fordi det er den mest hensiktsmessige metoden for en sylindrisk konstruksjon. Det finnes to aktuelle teknikker for vikling av fiber på mandrell: Våtvikling og vikling av preimpregnert fiber (prepreg). Preimpregnert fiber er allerede satt med matrise fra fabrikk og kan derfor vikles direkte på mandrellen. Ved våtvikling vil fiberen, som ikke er impregnert, bli trukket gjennom et bad med matrise før den vikles på mandrellen. Videre ser

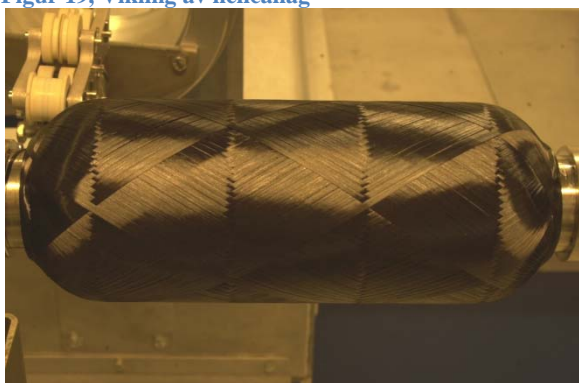
vi kun på vikling av prepreg, da det er denne metoden som benyttes for produksjon av 4-tomsflasker ved FFI. Mandrellen festes i viklemaskinen, og fibrene vikles i et ønsket mønster med ønsket strekk. Når karbonfiberen er på plass, blir det lagt på en strekkduk i nylon for kompaktering av konstruksjonen. Denne duken blir værende på under hele herdeprosessen. Når herdeprosessen er ferdig, tas duken av. Deretter blir Aquacore-mandrellen skylt ut slik at det bare er to endestykker og den viklede karbonfiberkonstruksjonen igjen. Den ferdige konstruksjonen skal utsettes for trykktesting og er derfor helt avhengig av å være tett. Den viklede karbonfiberen er ikke vann- eller gasstett, og innsiden må derfor smøres med et tett 3 komponents polyuretanlag. Figur 19-22 viser vikling av preimpregnert karbonfiber.



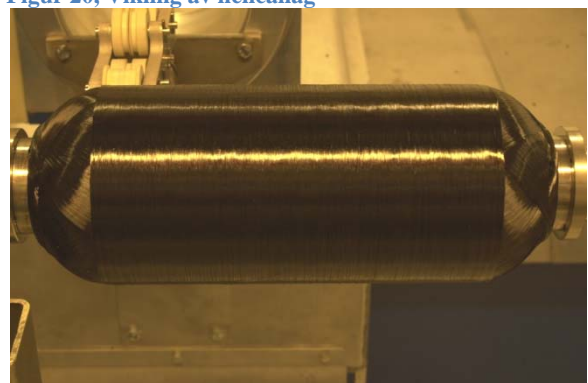
Figur 19, Vikling av helicallag



Figur 20, Vikling av helicallag



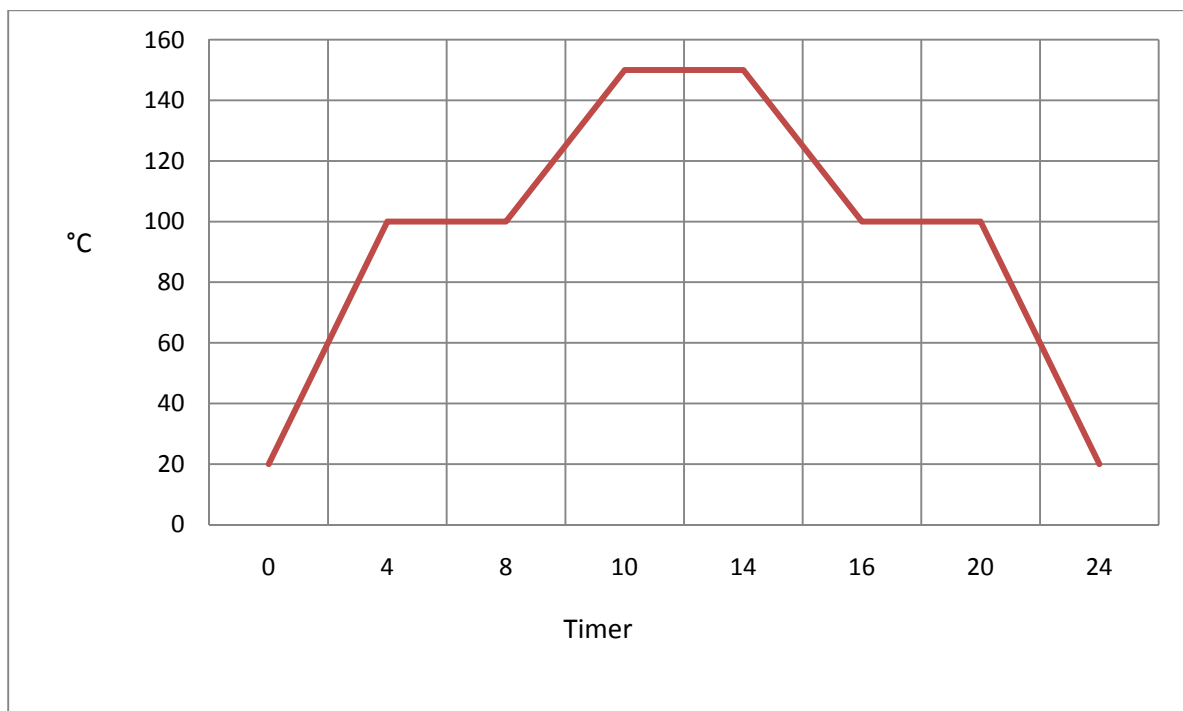
Figur 21, Vikling av helicallag



Figur 22, Vikling av hooplag

4.1.3 Herding

Herdingen av flasken foregår i en ovn med predefinert temperaturforløp. Temperaturen er ikke den samme under hele herdeprosessen. Leverandøren av prepregmaterialet spesifiserer optimal temperaturvariasjon, og endring av temperatur som funksjon av tid. Et eksempel på en typisk herdesyklus er gitt i figur 23. Under de høyeste temperaturene vil epoksyen bli mer viskøs. For å unngå at konstruksjonen siger, roterer den under hele herdeprosessen. Dette gir også jevnt temperaturforløp i hele konstruksjonen.



Figur 23, Typisk herdesyklus

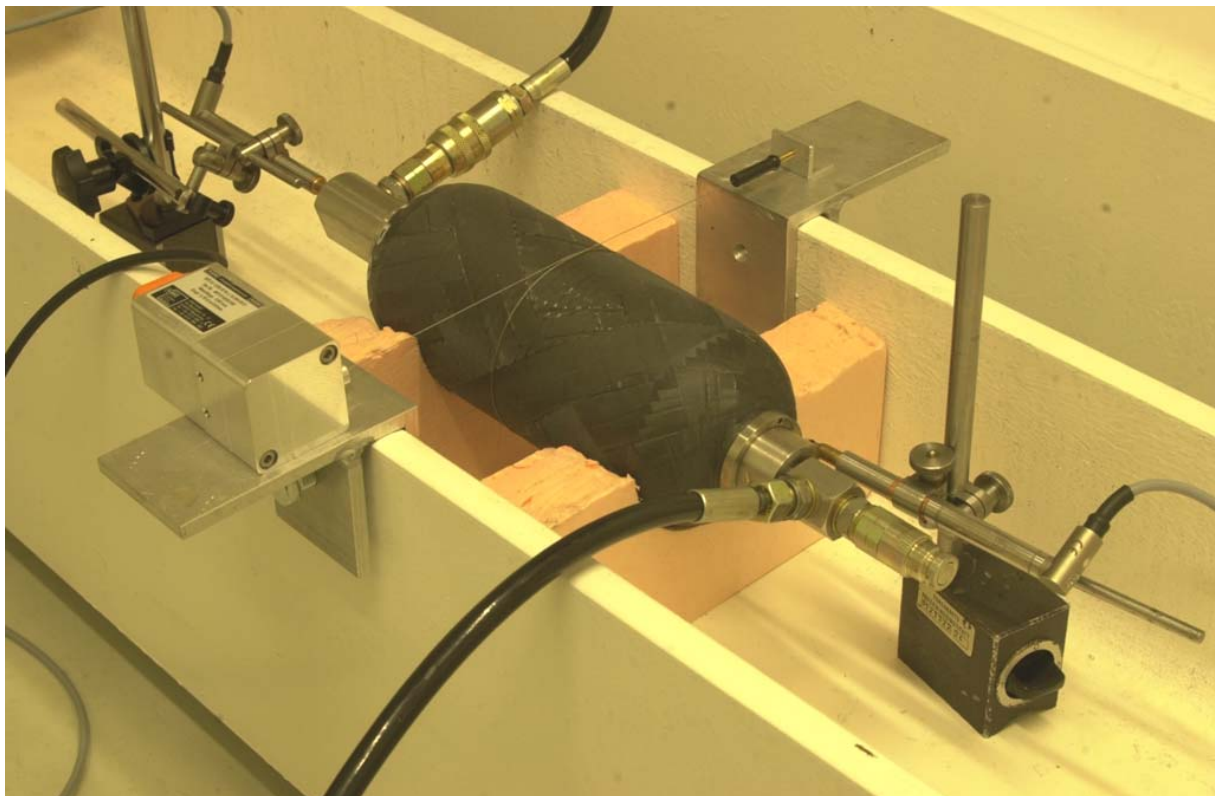
4.2 Testmetoder

For å kunne si noe om konstruksjonens egenskaper må den, i tillegg til analyser, også fysisk testes. Det utføres derfor trykktester for å sammenligne disse resultatene. Innenfor trykktesting har vi en kvalitetstest (også kalt ”prooftest”) og en sprengtest (også kalt ”bursttest”). For å kunne si noe om materialenes egenskaper hver for seg, utføres det strekktester.

4.2.1 Trykktesting

For å kunne bestemme konstruksjonens egenskaper, benyttes trykktesting. Denne typen testing kan igjen deles opp i kvalitets- og sprengtesting. I begge tilfellene blir tanken tilkoblet slanger som tilfører ønsket trykk ved hjelp av vann og luft. Ved kvalitetstesting vil tanken forbli intakt, da man bare øker trykket til 100 bar, mens ved sprengtesting økes trykket til tanken ryker. Når dette skjer utløses det voldsomme krefter, derfor er det viktig at tanken ligger beskyttet så ingen står i fare for å bli truffet av karbonfibersplinter eller andre gjenstander (se figur 25)

Kvalitetstest



Figur 24, 4-tomsflaske klar for kvalitetstest

Når man utfører en kvalitetstest, kjører man opp trykket til et ønsket nivå (100 bar i dette tilfellet) og måler radiell og aksiell utvidelse før, under og etter trykkøkning. Eksempel i figur 24. Aksiell utvidelse måles ved at to følere, settes helt inntil endestykkene på hver side av flasken. Disse vil da måle forflytningen når flasken utvider seg. Ved måling av radiell utvidelse, festes en tråd rundt midten av tanken. Tråden er festet til en føler som måler forlengelsen av tråden, og gir da økning i omkrets. Kvalitetstesten gjentas ofte to ganger for et

gitt nivå (100 bar) for å se effektene av første trykkøkning. Hensikten med denne testen er å se hvordan tanken oppfører seg under trykk med tanke på størrelsesendringer. Når trykktankene brukes som rakettmotorer i missiler, ligger de gjerne inni en stålkonstruksjon. Da er det nødvendig å ha kunnskap om tankens deformasjoner under trykk.

Sprengtest



Figur 25, 4-tomsflaske utsatt for sprengtest

Ved en sprengtest øker man trykket helt til flasken blir ødelagt. Ved FFI plasseres trykktanken i holdere av isopor og blir plassert mellom 2 h-profil stålbjelker (se figur 26 og 27). Hvilket trykk tanken tåler gir viktig informasjon som benyttes under analyse av tankene. Ved å analysere den sprengte flasken kan man også finne informasjon om i hvilket lag den røk og hva slags type brudd det var. Hvis ikke sprengtrykket var tilfredsstillende, kan man med den tilegnede informasjonen gjøre endringer som styrker konstruksjonen.

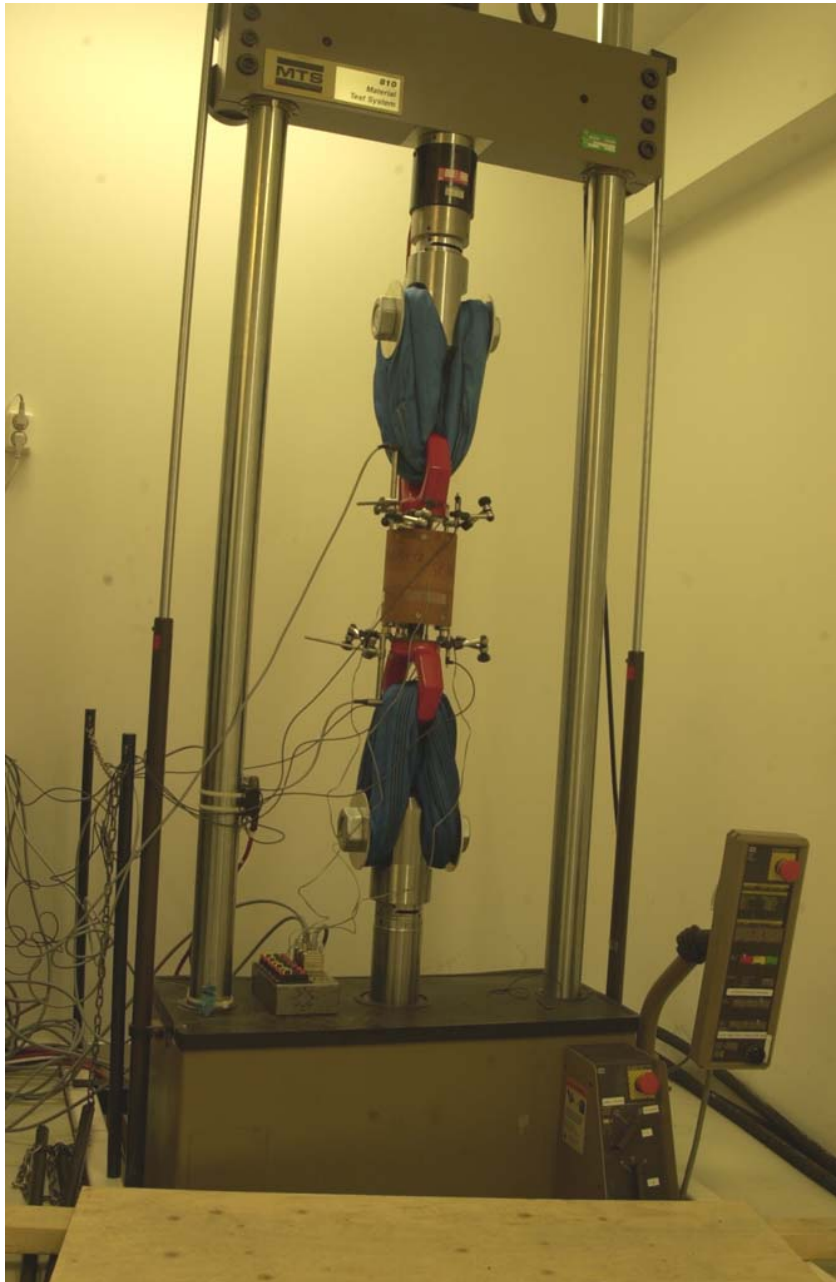


Figur 26, Beskyttelseskammer åpent



Figur 27, Beskyttelseskammer lukket

4.2.2 Materialtesting



Figur 28, Strekktesting av materiale

For å finne ut egenskapene til materialene hver for seg må disse også testes hver for seg. Å ha korrekte materialparametre er helt essensielt for å kunne lage en modell som gir virkelighetsnære resultater. Ved en strekktest plasseres en bit av materialet man vil teste, mellom to armer som drar i hver sin retning (se figur 28). Denne maskinen måler hvor mye materialet tåler av strekkrefter før det ryker. Etter endt strekktest kan man analysere bruddflaten for å se hva slags type brudd materialet har fått.

4.3 Hvilke produksjons- og herdefaktorer påvirker egenskapene til trykkflaskene?

Komposittmaterialer er anisotrope, består av flere komponenter og produksjonsprosessen består av flere operasjoner. Det er derfor en mengde faktorer som påvirker egenskapene til det ferdige produktet. I det videre vil noen mulige parametre som kan påvirke sprengtrykket til en trykkflaske i kompositt diskuteres.

4.3.1 Spenning i fiberen

Viklemaskinen kan programmeres til å gi prepregen et bestemt strekk når den legges på mandrellen. Dette er nødvendig for at karbonfiberen skal være utstrukket før den legges på. Hvis den ikke er utstrukket vil det oppstå hulrom ("voids") som svekker konstruksjonen. På den annen side kan for mye strekk også ha en negativ effekt. Når Aquacoren skylles ut vil de ytre lagene legge press på de indre. De testene som er utført viser at strekkverdien kan få store utslag. Et annet problem er at viklemaskinen ikke alltid klarer å opprettholde det strekket som er programmert [9]. Dette gjør det vanskelig å kunne gi et entydig svar på optimal strekkverdi [12].

4.3.2 Konsolideringstrykk

Etter vikling påføres en nylonduk (peelply) utenpå konstruksjonen for å gi trykk på konstruksjonen under herding og for å få ut overskuddet av epoksy. Her er litt av samme problemet som under vikling av prepreg. For mye strekk i peelply gir for høyt trykk på konstruksjonen. Dette kan gi mikrobukling, som igjen gjør at konstruksjonen tåler mindre belastning. Har man for lite strekk i peelply vil man få problemer med å få ut luftboblene som dannes under herding. For mange luftbobler vil også være med på å svekke konstruksjonen.

En mulighet er å skape et indre trykk. Når konstruksjonen herder, vil den bli utsatt for en temperaturøkning. Hvis man kan kle innsiden med for eksempel silikon (eller annet materiale med høy utvidelseskoeffisient) vil man kunne oppnå et trykk fra innsiden. Dette kombinert med høyt strekk i peelply vil muligens gjøre at man får mindre luftbobler og overskuddsepoksy. Man vil også kanskje unngå mikrobukling da det indre trykket står i mot strekket i peelply.

4.3.3 Temperaturforløp under herding

Temperaturforløpet som blir brukt per dags dato er det som har blitt oppgitt av leverandøren av prepegen.

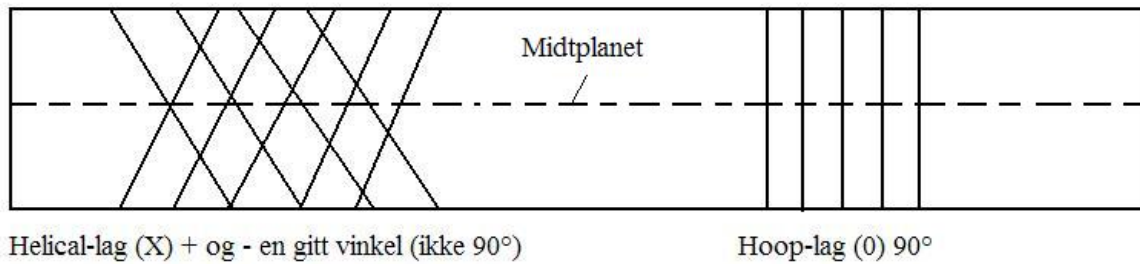
Noe av problemet med å varme opp i en ovn er at trykkflasken kun eksponeres for den økte temperaturen, i forhold til romtemperatur, fra utsiden. Dette betyr at de ytre lagene vil oppleve et annet temperaturforløp enn de innerste lagene [11]. Det er ikke sikkert de innerste lagene noen gang kommer opp i den temperaturen som de er ment å oppleve. For å få en tettest mulig komposittstruktur, er det viktig at epoksyen kommer opp i en slik temperatur at den får blandet seg ordentlig med fiberen. Det er mulig å bruke en mandrell som gir fra seg varme, og denne vil kunne varme opp konstruksjonen fra innsiden. Da vil man kunne få samme temperaturpåvirkning fra ut- og innsiden av konstruksjonen. Dette vil føre til at man når et mer likt temperaturbilde, og man er sikrere på at alle deler av konstruksjonen vil komme opp i ønsket temperatur.

En annen faktor er hastigheten som konstruksjonen roterer med når den herder. Hulrommene forflytter seg ved oppdrift og varmen vil alltid stige.

Konsistensen på matrisen vil også være forskjellig for de ulike typene matriser.

Glassovergangstemperaturen T_g angir ved hvilken temperatur et stoff går fra glassaktig (kald) til elastomer (varm) fase. I glassfasen er polymerkjedene ”låst fast”. Ved T_g forandres blant annet varmekapasitet, stivhet og termisk utvidelseskoeffisient. For epoksy ligger T_g på mellom 100 og 250 °C. Når matrisen er varmet opp så mye at den flyter, vil fiberen kunne miste en del av spenningen på grunn av en veldig høy E-modul [7, 14]. Det vil si at en liten sammentrekning vil kunne ha mye å si for spenningen.

4.3.4 Viklemønster



Figur 29, Hoop- og helicallag

Hos FFI vikles det enten et XX0 eller X0X0 mønster. Et X-lag (også kalt et helical-lag) er et lag orientert med en vinkel mindre enn 90° på midtplanet. Laget legges med positiv og negativ vinkel (se figur 29). Et 0-lag (også kalt hoop-lag) legges med 90° orientering i forhold til midtplanet.

4-tomsflaskene ved FFI vikles med 30° og -30° i helical-laget. Geometrien til endestykkene er beregnet på denne vinkelen. Formen på endestykkene er geodesiske i forhold til 30 grader slik at de preimpregnerte karbonfibrene ikke beveger seg sideveis når de påføres [10, 11, 13]. Hvis en skal endre vinkelen det vikles med i helical-lagene må en da endre geometrien på endestykkene. På grunn av friksjon mellom metallendestykke og kompositt er det mulig med små endringer av vinkelen uten å måtte endre endestykkets geometri.

4.3.5 Hulrom

For å kunne fjerne mest mulig hulrom, er det mulig å la konstruksjonen gjennomgå et herdeforløp mellom hvert lag som vikles. Dette vil kunne redusere andelen hulrom, men problemet er at dette er en meget tidkrevende prosess. Hvis den kapasitetsmessige gevinsten er liten, er det ikke sikkert at det lønner seg.

Det at fibrene ikke legger seg 100 % inntil hverandre kan også være med på å skape hulrom. For å være sikker hadde det vært mulig å legge på prepregen med overlapp, men da risikerer man å få en ujevn struktur noe som kanskje svekker konstruksjonen mer enn de eventuelle hulrommene. Fiberbunten ("toven") som brukes i dag består av ca. 18000 karbonfibertråder preimpregnert med epoksy. For å få fiberbuntene til å sitte tettere sammen, kan det hjelpe å tilføre fiberbunten varme idet den påføres. Dette kan også muligens føre til at vi får en jevnere bredde.

4.3.6 Viklehastighet

Viklehastigheten kan være med på å bestemme den ferdige konstruksjonens egenskaper. Ved for rask vikling vil det kunne danne seg luftlommer der luften ikke ”rekker” å slippe ut. I tillegg blir det vanskelig å avdekke eventuelle feil, da disse raskt blir dekket over av ny fiber. Viklehastigheten kan også ha en innvirkning på strekket i fiberen når den blir lagt på.

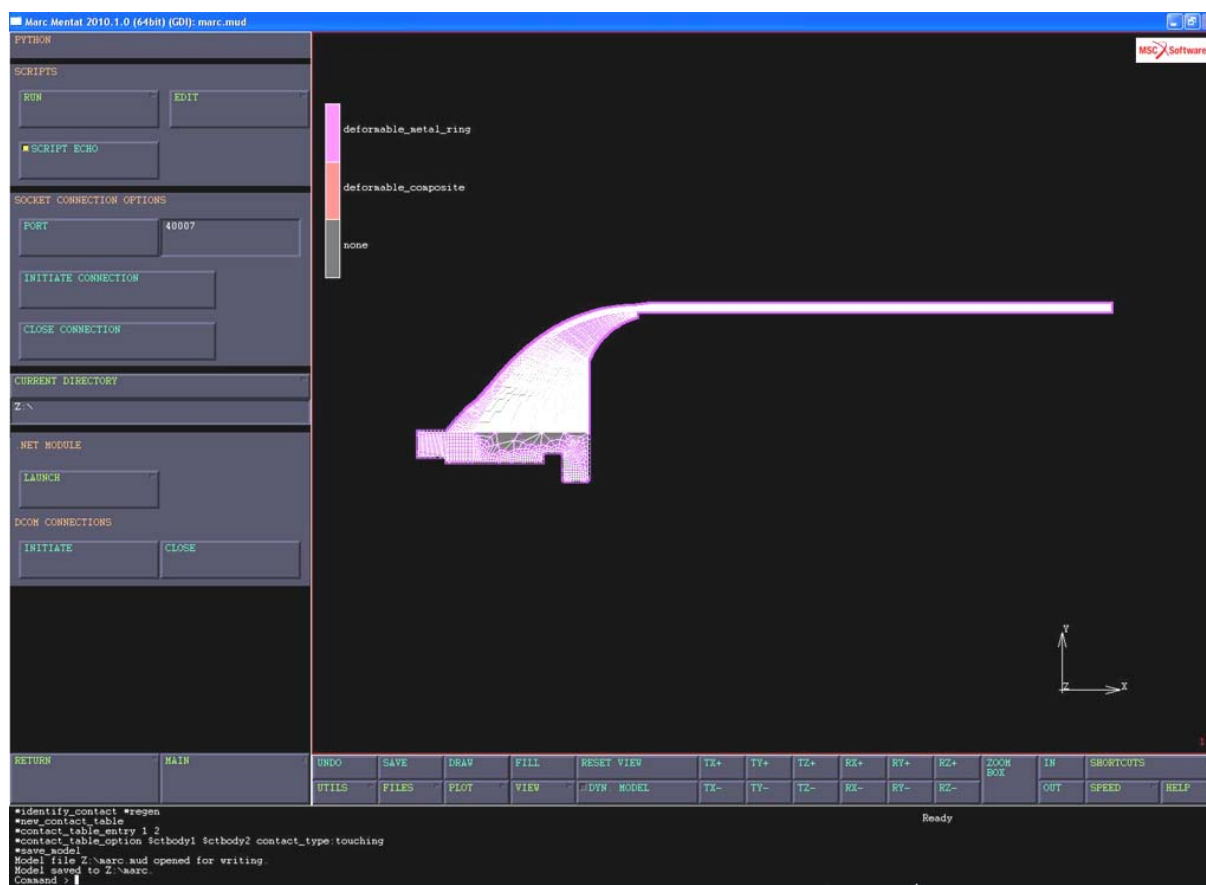
5 Modellering og simulering

Modellering og simulering er veldig nyttige verktøy når man designer komplekse konstruksjoner. Tidligere i oppgaven har vi gått gjennom de numeriske metodene for å beregne spenninger og tøyninger i kompositt. Disse kan benyttes så lenge konstruksjonene er enkle. Når vi skal se på mer avanserte konstruksjoner med mange elementer og kompleks geometri må man ty til dataverktøy.

I dette kapittelet vil vi først gå gjennom de ulike dataverktøyene som er benyttet i oppgaven. Videre vil vi se på en tynnvegget sylinder for å undersøke ulike typer analyseverktøy. Til slutt blir geometrien og oppbygningen av 4-tomsflasken presentert.

5.1 Programvare benyttet i oppgaven

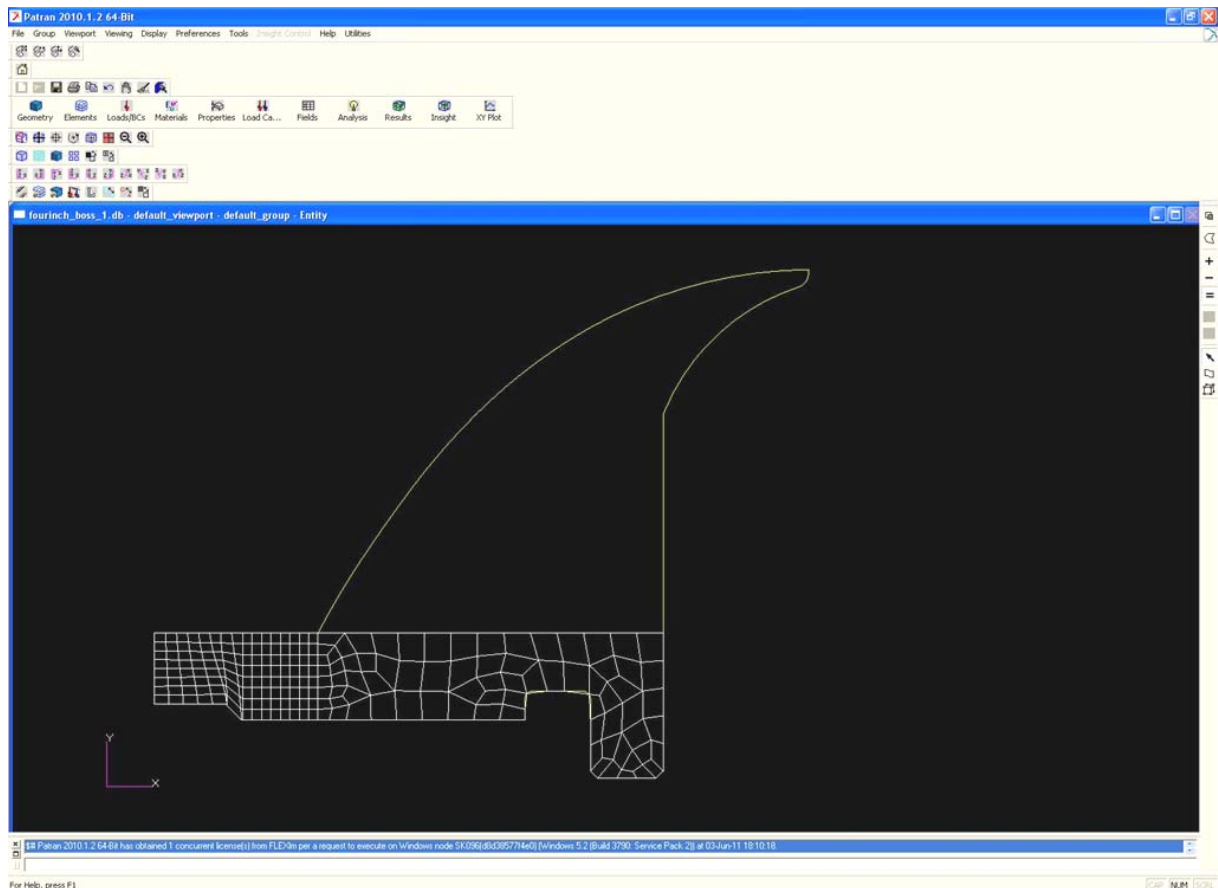
Marc Mentat



Figur 30, Marc Mentat skjermbilde

Marc Mentat er et analyseprogram som kan utføre både statiske og dynamiske analyser. Det er spesielt utviklet for ikke-lineære problemer og er velegnet for store tøyninger og kontaktanalyse. I denne oppgaven har Marc Mentat blitt brukt til å utføre statiske analyser av sylindere og 4-tomsflasker i kompositt (se figur 30).

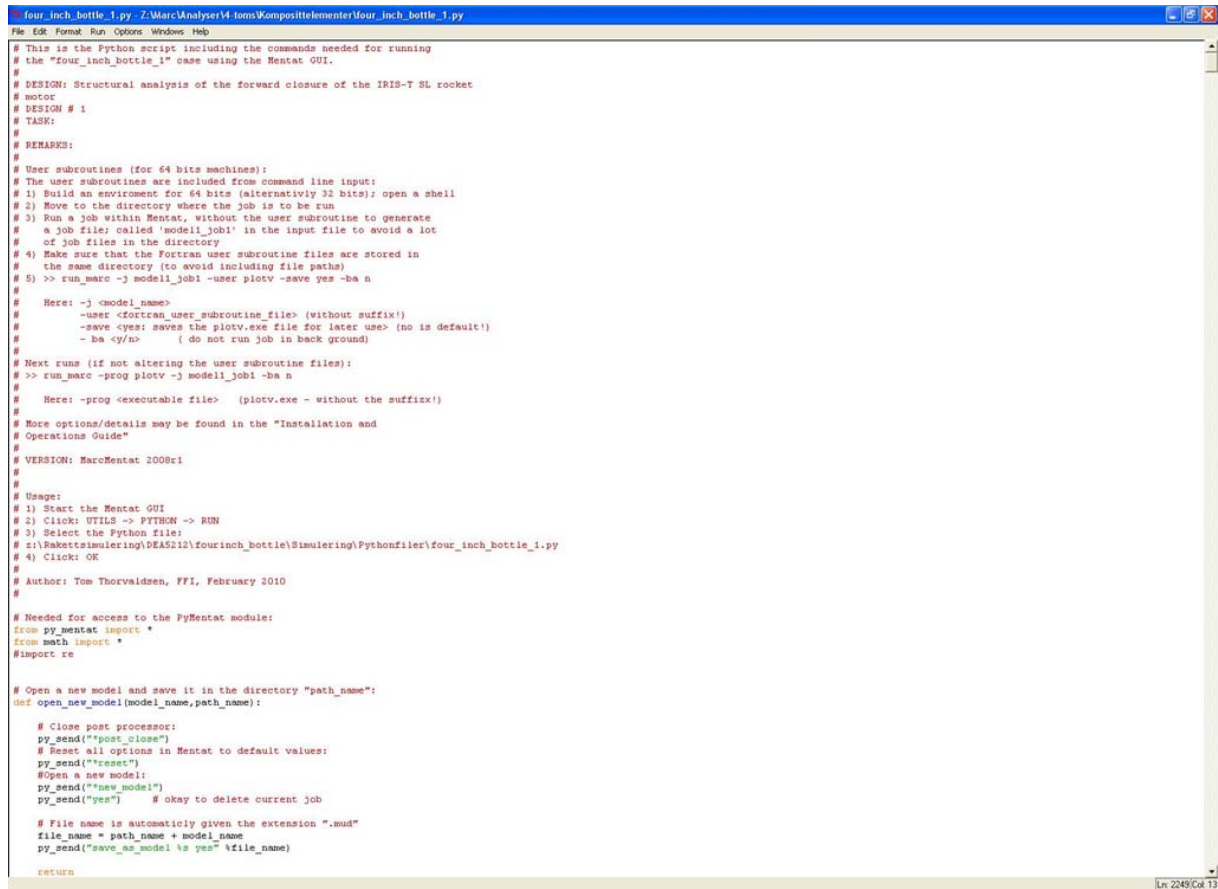
Msc. Patran



Figur 31, Patran skjermbilde

Patran er et pre- og postprosesseringsverktøy for elementanalyser. Patran brukes til å lage modeller som kan løses i diverse elementanalyseprogrammer som for eksempel Marc/Mentat, Nastran og Abaqus. I denne oppgaven har Patran blitt brukt til å lage geometrien til sylindrerne og 4-tomsflasken i kompositt (se figur 31).

Python



```
four_inch_bottle_1.py - Z:\Marc\Analyser\4-toms\KomposittElementer\four_inch_bottle_1.py
File Edit Format Run Options Windows Help

# This is the Python script including the commands needed for running
# the "four_inch_bottle_1" case using the Mentat GUI.
#
# DESIGN: Structural analysis of the forward closure of the IRIS-T SL rocket
# motor
# DESIGN # 1
# TASK:
#
# REMARKS:
#
# User subroutines (for 64 bits machines):
# The user subroutines are included from command line input:
# 1) Build an environment for 64 bits (alternatively 32 bits); open a shell
# 2) Move to the directory where the job is to be run
# 3) Run a job within Mentat, without the user subroutine to generate
#    a job file; called 'modell_job1' in the input file to avoid a lot
#    of job files in the directory
# 4) Make sure that the Fortran user subroutine files are stored in
#    the same directory (to avoid including file paths)
# 5) >> run_marc -j modell_job1 -user plotv -save yes -ba n
#
# Here: -j <model_name>
#       -user <fortran_user_subroutine_file> (without suffix!)
#       -save <yes> saves the plotv.exe file for later use (no is default!)
#       -ba <y/n>      ( do not run job in back ground)
#
# Next runs (if not altering the user subroutine files):
# >> run_marc -prog plotv -j modell_job1 -ba n
#
# Here: -prog <executable file> (plotv.exe - without the suffix!)
#
# More options/details may be found in the "Installation and
# Operations Guide"
#
# VERSION: MarcMentat 2008r1
#
# Usage:
# 1) Start the Mentat GUI
# 2) Click: UTILS -> PYTHON -> RUN
# 3) Select the Python file:
#    z:\Rakettsimulering\PEAS212\fourinch_bottle\Simulering\Pythonfiler\four_inch_bottle_1.py
# 4) Click: OK
#
# Author: Tom Thorvaldsen, FFI, February 2010
#
# Needed for access to the PyMentat module:
from py_mentat import *
from math import *
import re

# Open a new model and save it in the directory "path_name":
def open_new_model(model_name,path_name):

    # Close post processor:
    py_send("post_close")
    # Reset all options in Mentat to default values:
    py_send("reset")
    # Open a new model:
    py_send("new_model")
    py_send("yes")      # okay to delete current job

    # File name is automatically given the extension ".mud"
    file_name = path_name + model_name
    py_send("save_as_model %s yes" %file_name)

    return
```

Figur 32, Skjerm bilde av Python

Python er et objektorientert programmeringsspråk. Marc Mentat inneholder en funksjon kalt PyMentat. Denne gjør at Marc Mentat kan lese dokumenter skrevet med Python språk og utføre disse kommandoene. I denne oppgaven har Python blitt brukt til å lage et script med alle kommandoene som har blitt kjørt i Marc Mentat [4] (se figur 32).

Laminated tube

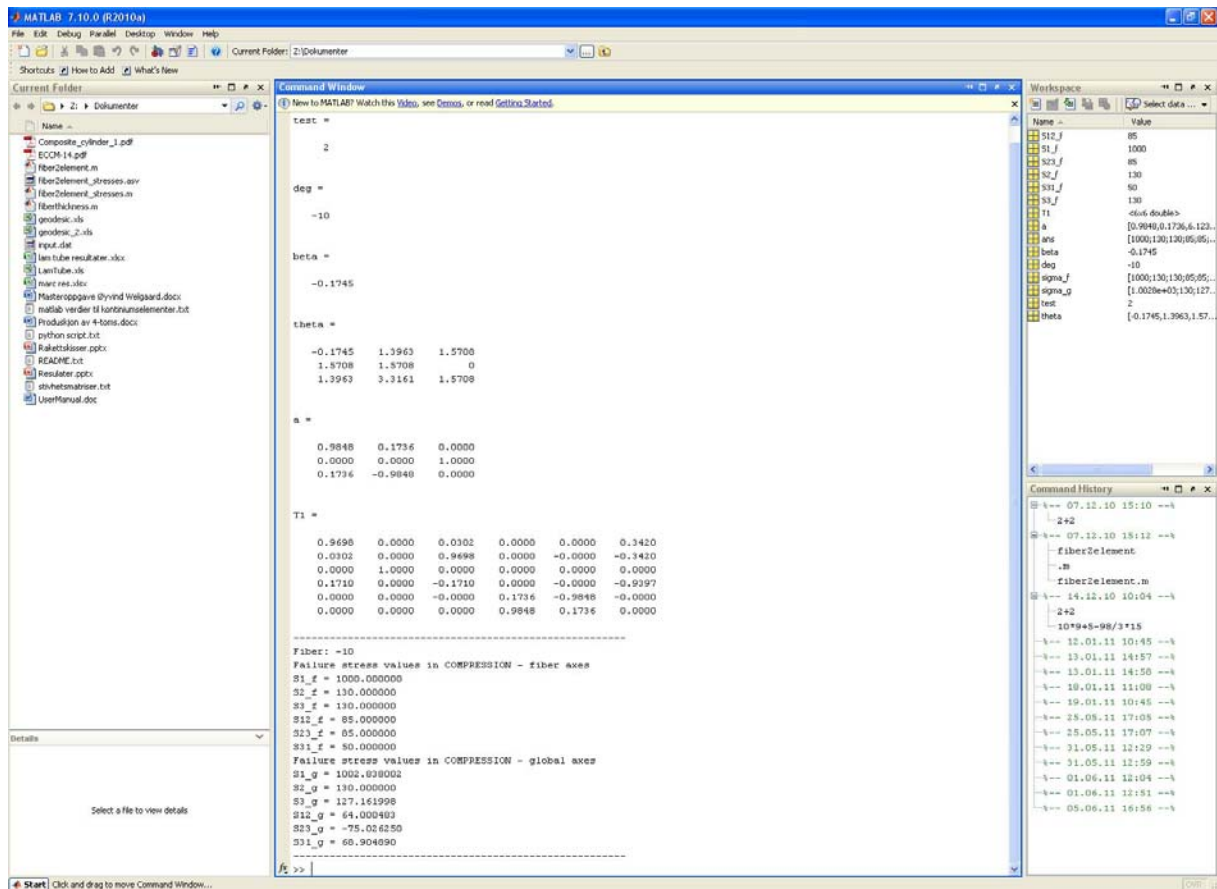
The screenshot shows the LamTube.xls spreadsheet with the following data:

Program options:	Testing	Current drive:	Z
Title	Testing	Program location:	\\Laminated_tube
IPRNT - Print C and Cbar materices of each layer (1=yes)	0		
INCR - Number of integration points in each layer :	6		
J - Number of layers (minimum 2):	3		
RI(1) - Inside radius of tube	68,25		
Parametric study			
Itype - (0) No parametric study, (1) Parametric study on	0		
phi, (2) Off axis helical wound tube			
Amax - maximum angle	90		
Amin - Minimum angle	0		
Ainc - Angle increment	9		
Loads			
DT - Temperature change	0		
P - Axial load [N]	102436,1445	Closed tube: <input checked="" type="checkbox"/>	
TW - Torque applied to tube end	0		
PI - Internal pressure [MPa]	7		
PO - External pressure [MPa]	0	thickness: 1,5	
Layup			
Layer number	Fiber angle	Thickness of layer [mm]	Material number
23 1	-45	0,5	8
24 2	45	0,5	8
25 3	90	0,5	8
26			
27			
28			
29			
30			

Figur 33, Laminated tube skjermbilde

Laminated tube er et Excel-basert analyseverktøy utviklet i et tidligere prosjekt ved FFI. Verktøyet er basert på laminatteori. Dette er et relativt enkelt program som hurtig gir deg et estimat på hvilken tykkelse og lagoppbygning som behøves (se figur 33). I denne oppgaven har Laminated tube blitt brukt til å beregne spenninger og deformasjoner i tynnveggede komposittsyndere.

MATLAB



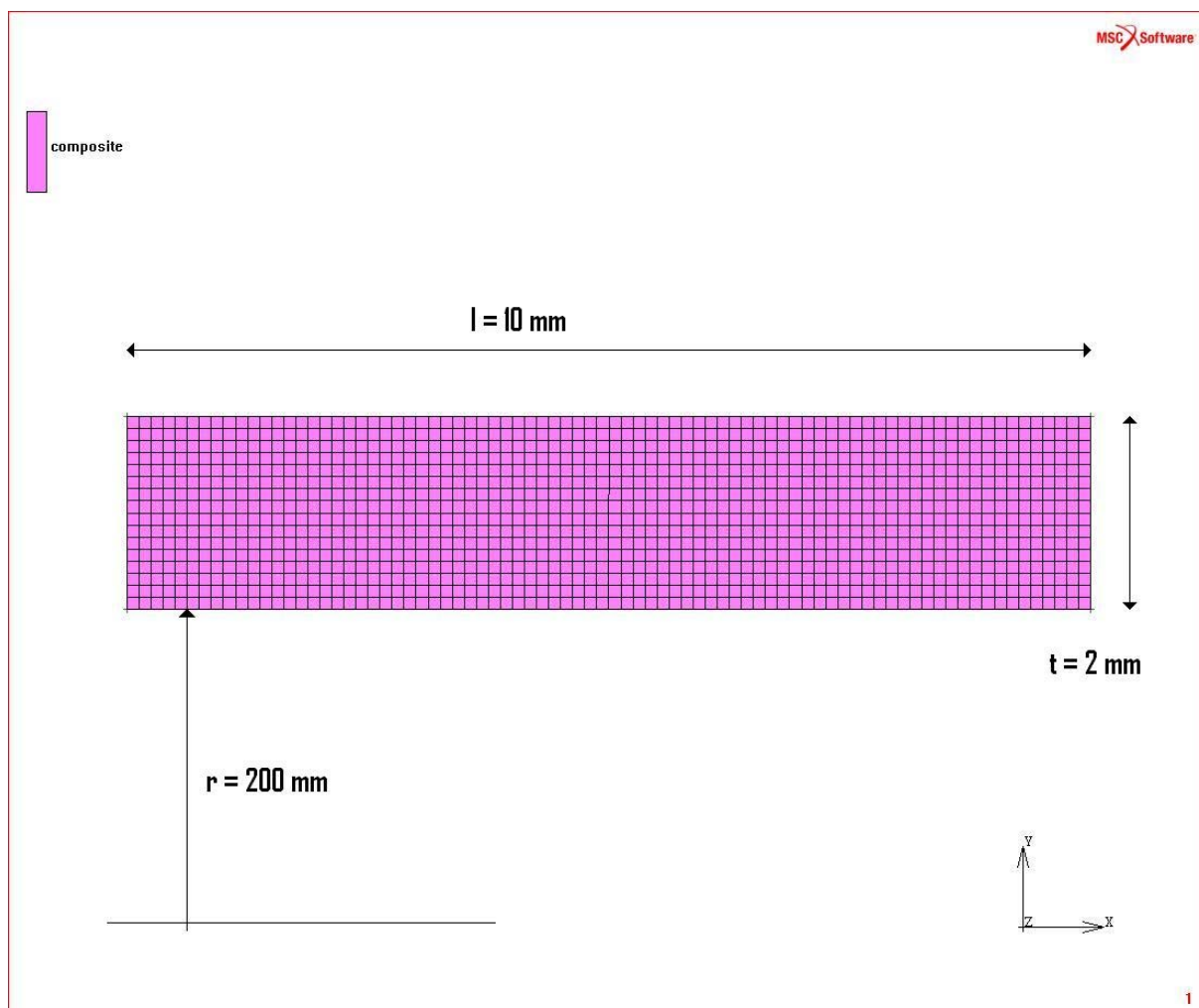
Figur 34, MATLAB skjermbilde

MATLAB er et avansert matematikkprogram som har et eget scriptspråk basert på programmeringsspråket C (se figur 34). Programmet er mye brukt blant ingeniører og naturvitenskapelige studenter. I MATLAB kan man utføre enkel matrisemanipulering, plotting av funksjoner og data, implementering av algoritmer og man kan opprette brukergrensesnitt mot andre programmeringsspråk. I denne oppgave har MATLAB blitt brukt til å beregne stivhetsmatrisene til de forskjellige orienteringene til komposittmaterialet.

5.2 Test av kontinuum- og komposittlementer i Marc

Det har vært en viss usikkerhet knyttet til komposittlementene i Marc/Mentat. Derfor må det avgjøres om disse er gode nok for bruk i analyse av 4-tomsflasker. For å kunne sammenlikne resultatene fra Marc med analytisk beregning, velges en tynnvegget sylinder som forsøksmodell. Resultatet vil også bli sjekket opp mot Laminated tube. Det vil bli simulert både en åpen og lukket modell av sylindren.

5.2.1 Geometri



Figur 35, Geometri til sylinder

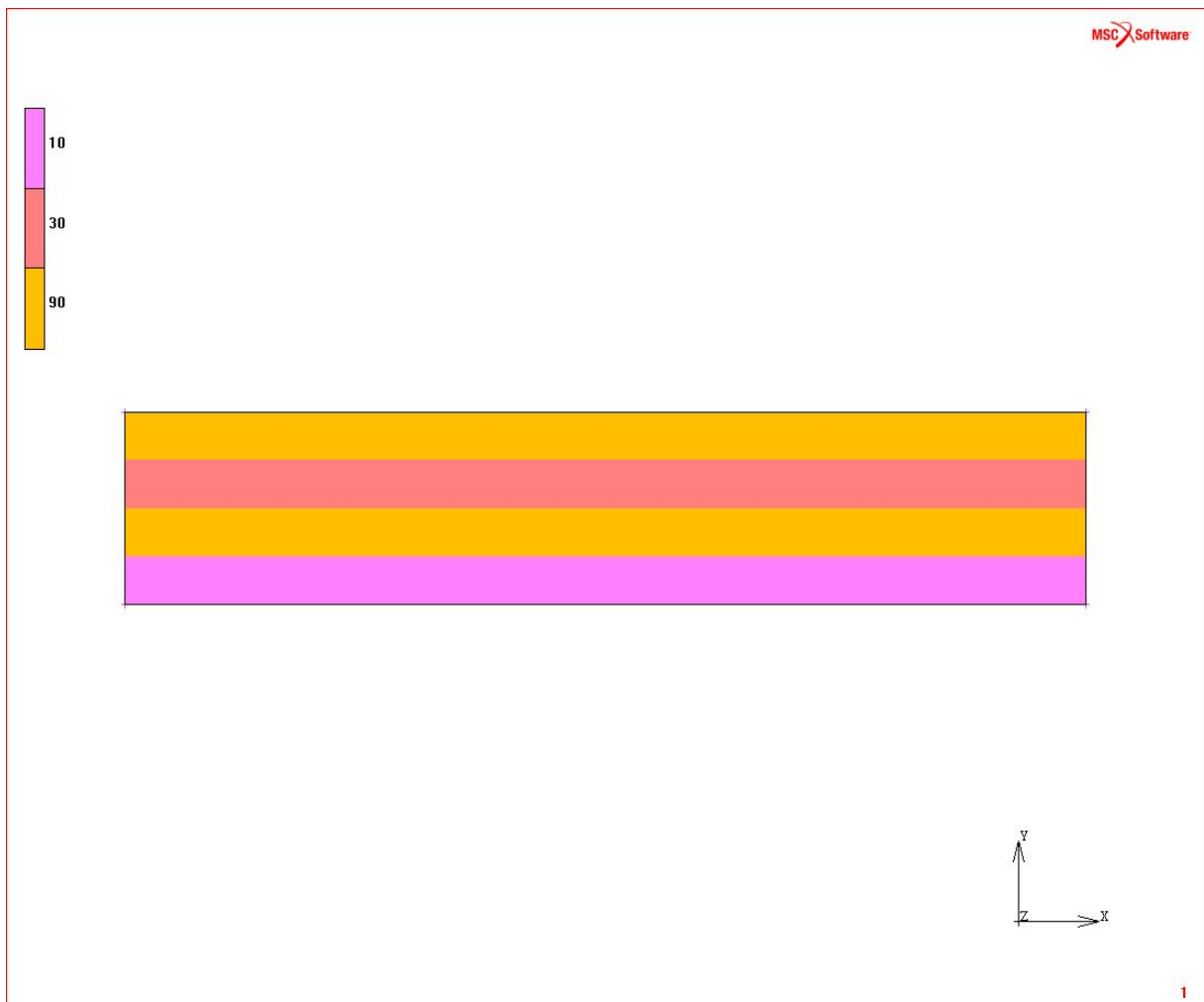
Sylindren som er valgt har en lengde på 10 mm, tykkelse på 2 mm og indre radius på 200 mm (se figur 35). Indre radius og tykkelse er valgt for å få en tynnvegget sylinder. Ved å benytte en tynnvegget sylinder, kan vi sammenlikne resultatene med enkle analytiske

beregninger. Kravet til dette er at tykkelsen skal være maksimum 1 % av den indre radiusen; $2/200 = 1 \%$. En åpen og lukket variant av sylindren vil bli undersøkt.

5.2.2 Lagoppbygning

Sylindren består av 4 lag i tykkelsen, det vil si at hvert lag har 4 elementer da det er 16 totalt. Lag 2 og 4 er i alle tilfellene et 90 graders lag også kalt *hoop*-lag. De lagene som ikke er 90 eller 0 grader vil bli lagt i en positiv og negativ retning. Her er det valgt å simulere dette på to forskjellige måter.

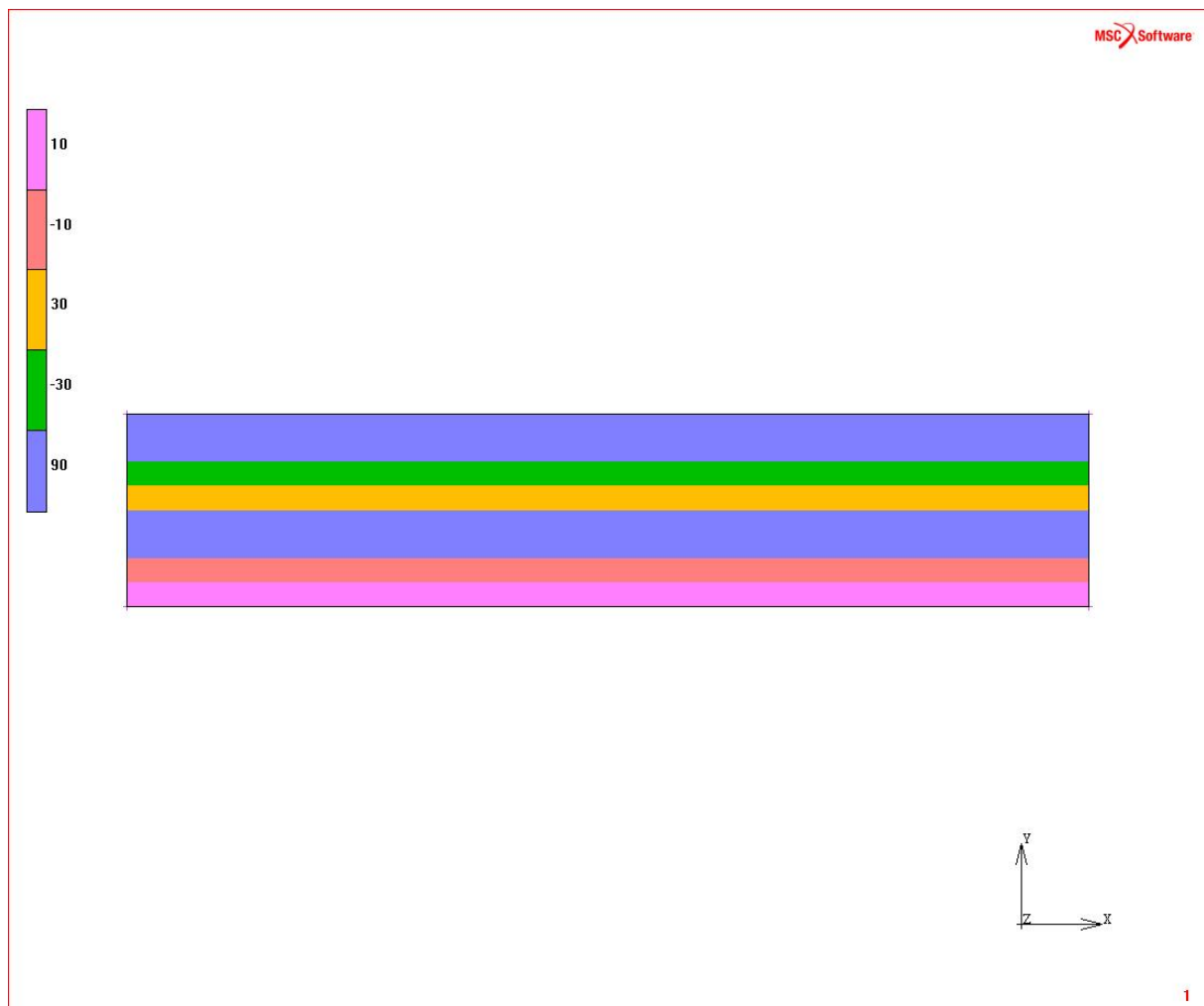
Tilfelle 1



Figur 36, Tilfelle 1: Sammenslåtte stivhetsmatriser

Alle elementene innenfor ett lag får samme egenskaper. Stivhetsmatrisen til den positive og negative vinkelen vil bli lagt sammen (se figur 36).

Tilfelle 2



Figur 37, Tilfelle 2: Separate stivhetsmatriser

De to første elementene vil få stivhetsmatrisen til den positive vinkelen. De to neste vil få stivhetsmatrisen til den negative vinkelen (se figur 37).

5.2.3 Elementtype

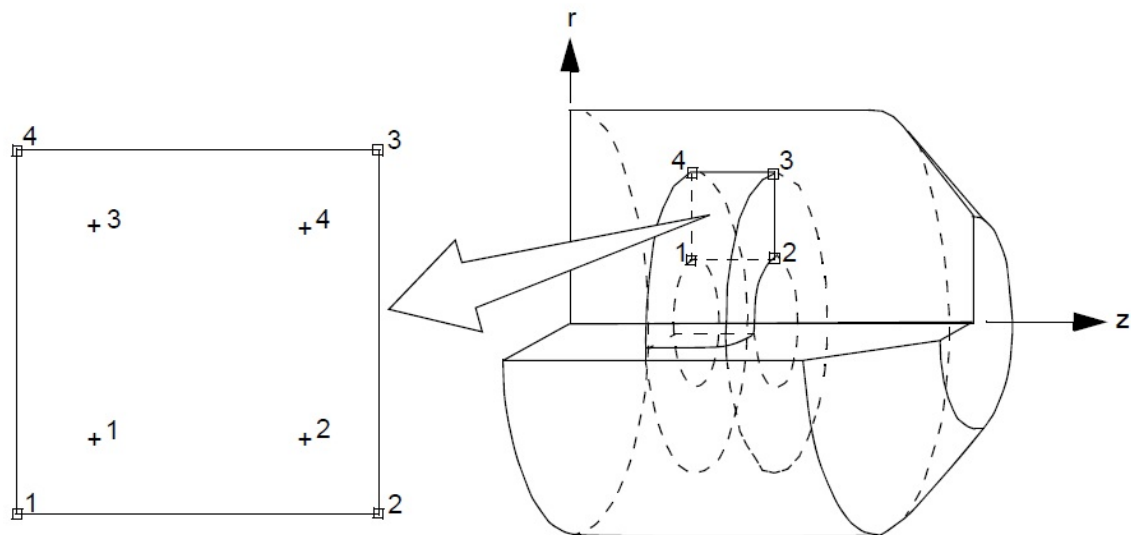
For kontinuums-elementene er det valgt elementtype 20 som er et 4-noders, aksesymmetrisk torsjonselement. For kompositt-elementene er det valgt elementtype 152 som er et 4-noders, aksesymmetrisk kompositt-element. For metallendestykket brukes det element 10. For detaljert informasjon om elementene se [6].

Element 10

Elementtype 10 er et 4-noders aksesymmetrisk element (se figur 38). Tøyningene er vanligvis konstante gjennom elementet da det bruker bilineære interpoleringsfunksjoner. På grunn av dette fremstilles skjær på en dårlig måte. Element 10 foretrekkes framfor høyere ordens elementer når det kommer til kontaktanalyser. Stivheten til elementet er funnet ved 4-punkts Gauss-integrasjon.

Elementet har to frihetsgrader:

1. u forskyvning i global z -retning
2. v forskyvning i global r -retning



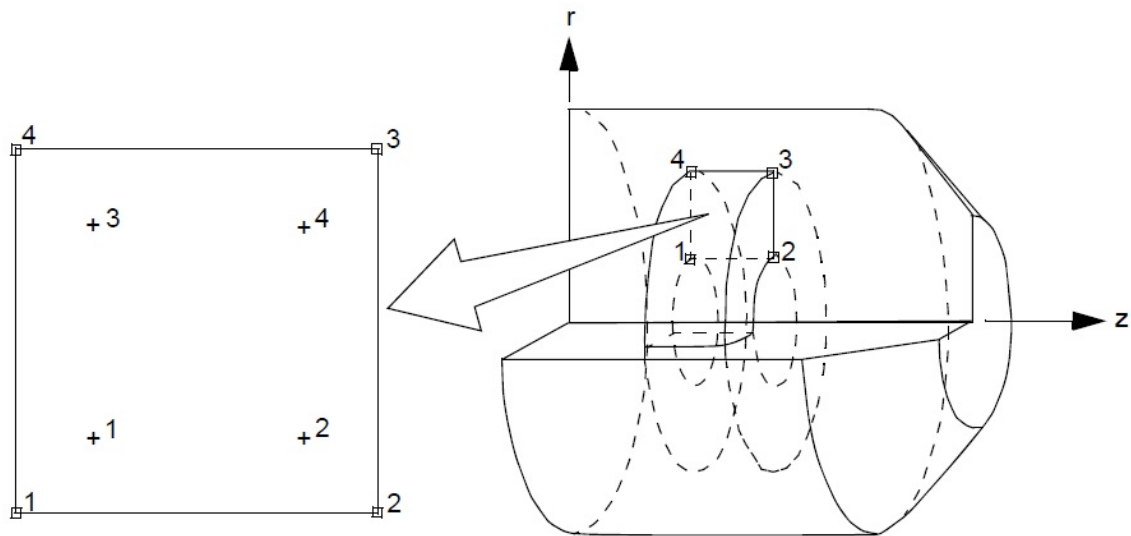
Figur 38, Integrasjonspunkter for element 10, hentet fra [6]

Element 20

Elementtype 20 er et 4-noders, aksesymmetrisk element (se figur 39). Tøyningene er vanligvis konstante gjennom elementet, da det bruker bilineære interpoleringsfunksjoner. På grunn av dette fremstilles skjær på en dårlig måte. Element 20 foretrekkes framfor høyere ordens elementer i kontaktanalyse. Stivheten til elementet er funnet ved 4-punkts Gauss-integrasjon.

Elementet har tre frihetsgrader:

1. u forskyvning langs symmetrisk akse
2. radiell forskyvning
3. vinkelforskyvning om symmetrisk akse (målt i radianer)



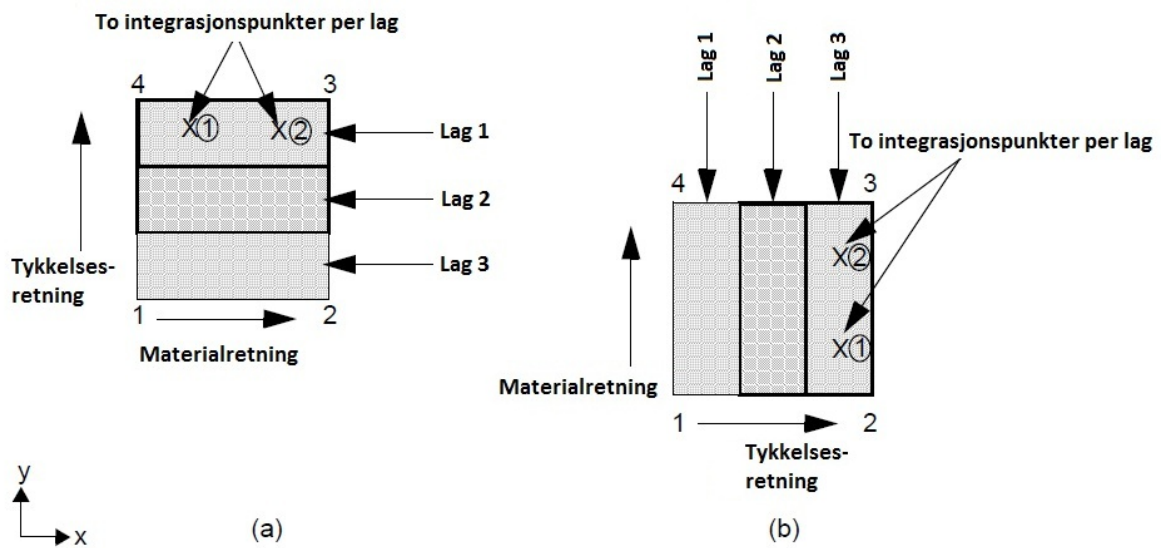
Figur 39, Integrasjonspunkter for element 20, hentet fra [6]

Element 152

Elementtype 152 er et 4-noders, aksesymmetrisk komposittlement (se figur 40). I disse elementene kan det legges inn opptil 5 lag. For å opprettholde stabiliteten i elementet må det være minimum 2 lag i hvert element. Det kan benyttes forskjellige materialegenskaper i de ulike lagene innenfor et element. Tøyningene er vanligvis konstante gjennom elementet da det bruker bilineære interpoleringsfunksjoner. På grunn av dette fremstilles skjær på en dårlig måte. Stivheten til elementet er funnet ved 4-punkts Gauss-integrasjon.

Elementet har to frihetsgrader:

1. u forskyvning i global z -retning (aksiell)
2. v forskyvning i global r -retning (radiell)

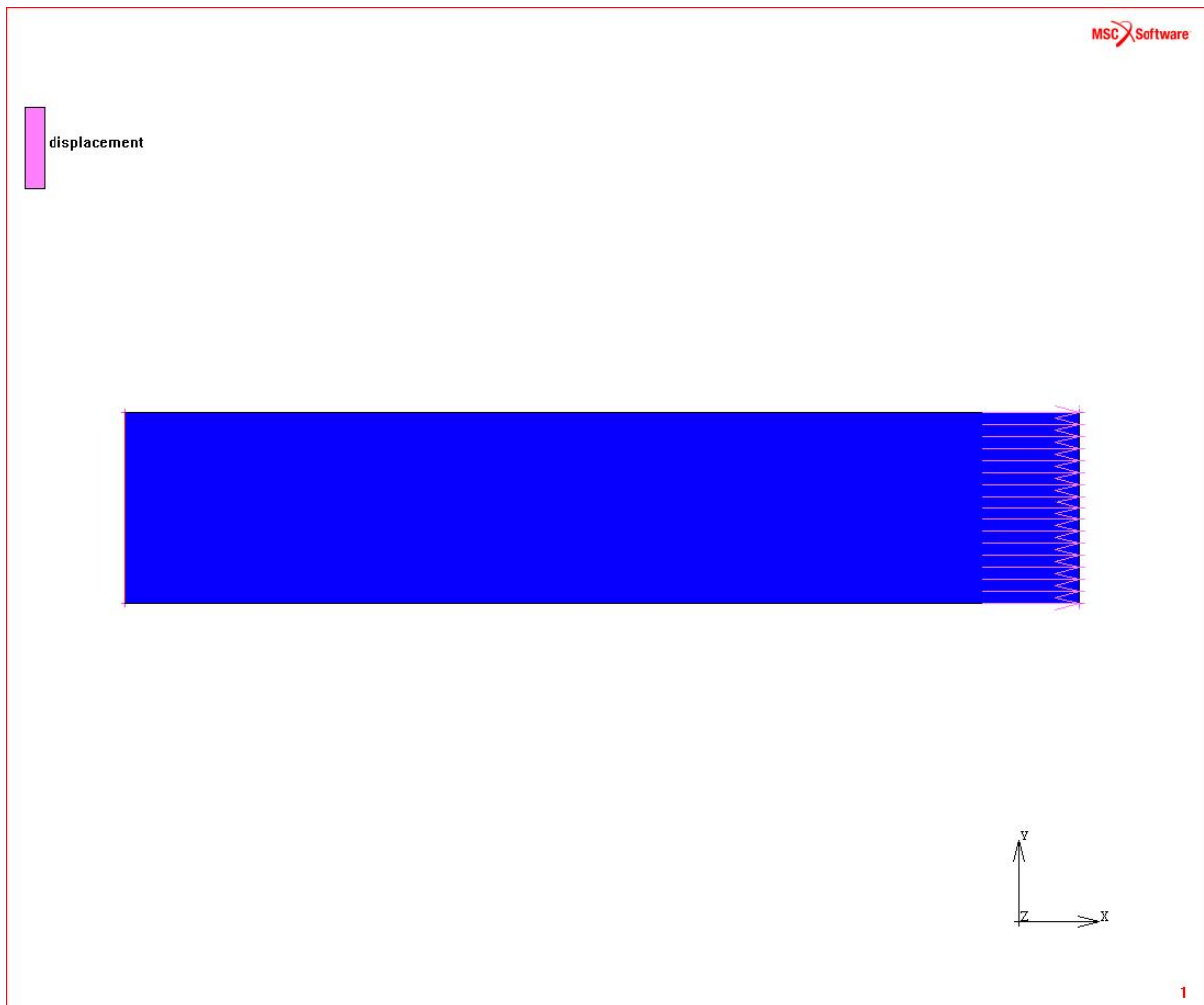


Figur 40, Integrasjonspunkter for element 152, hentet fra Marc Mentat element library

5.2.4 Materialdefinisjon for elementene

For komposittlementene er det tatt utgangspunkt i et ortotropt materiale, mens for kontinuumselementene brukes en anisotrop materialbeskrivelse. Materialdata for alle testene er gitt i vedlegg A. Materialparametrene refererer til de lokale fiberaksene, hvor den første aksens er langs fibrene, mens andre og tredje aksens er normalt på førsteaksen definert av høyrehåndsregelen.

5.2.5 Randbetingelser

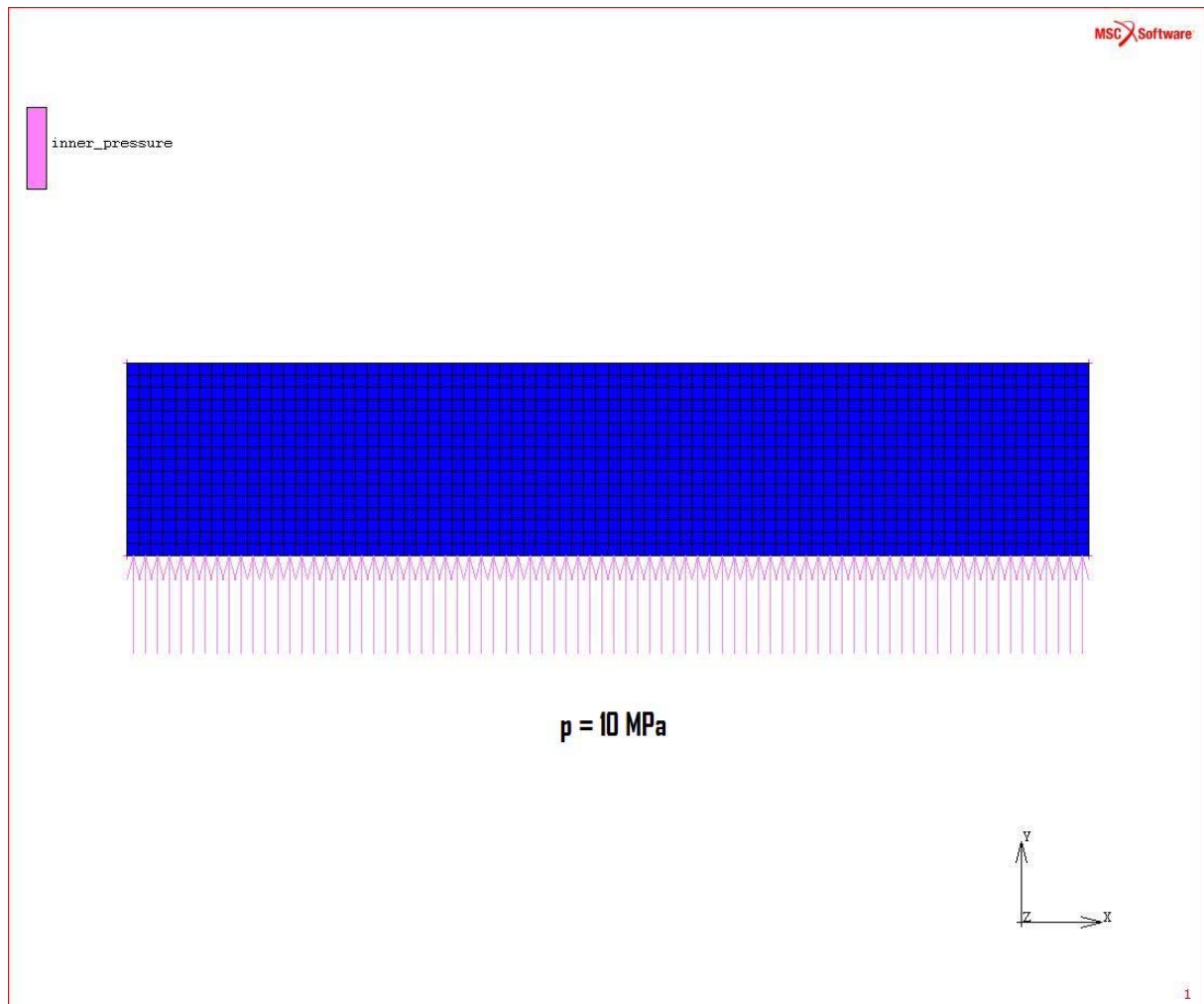


Figur 41, Randbetingelser for åpen sylinder

For å unngå bevegelse av stivt legeme ("rigid body motions") må en av nodene fastholdes. Det må også fastsettes randbetingelser ved symmetriplanet. Symmetriplanet er definert som høyre side av sylindren. Randbetingelsene er like for både kontinuums- og komposittlementene.

Nodene på symmetriplanet er fastlåst mot forskyvning i aksial retning (x-retning) og ut av planet (z-retning). Dette betyr at disse nodene bare kan forskyves i radiell retning (y-retning) (se figur 41).

5.2.6 Påførte laster

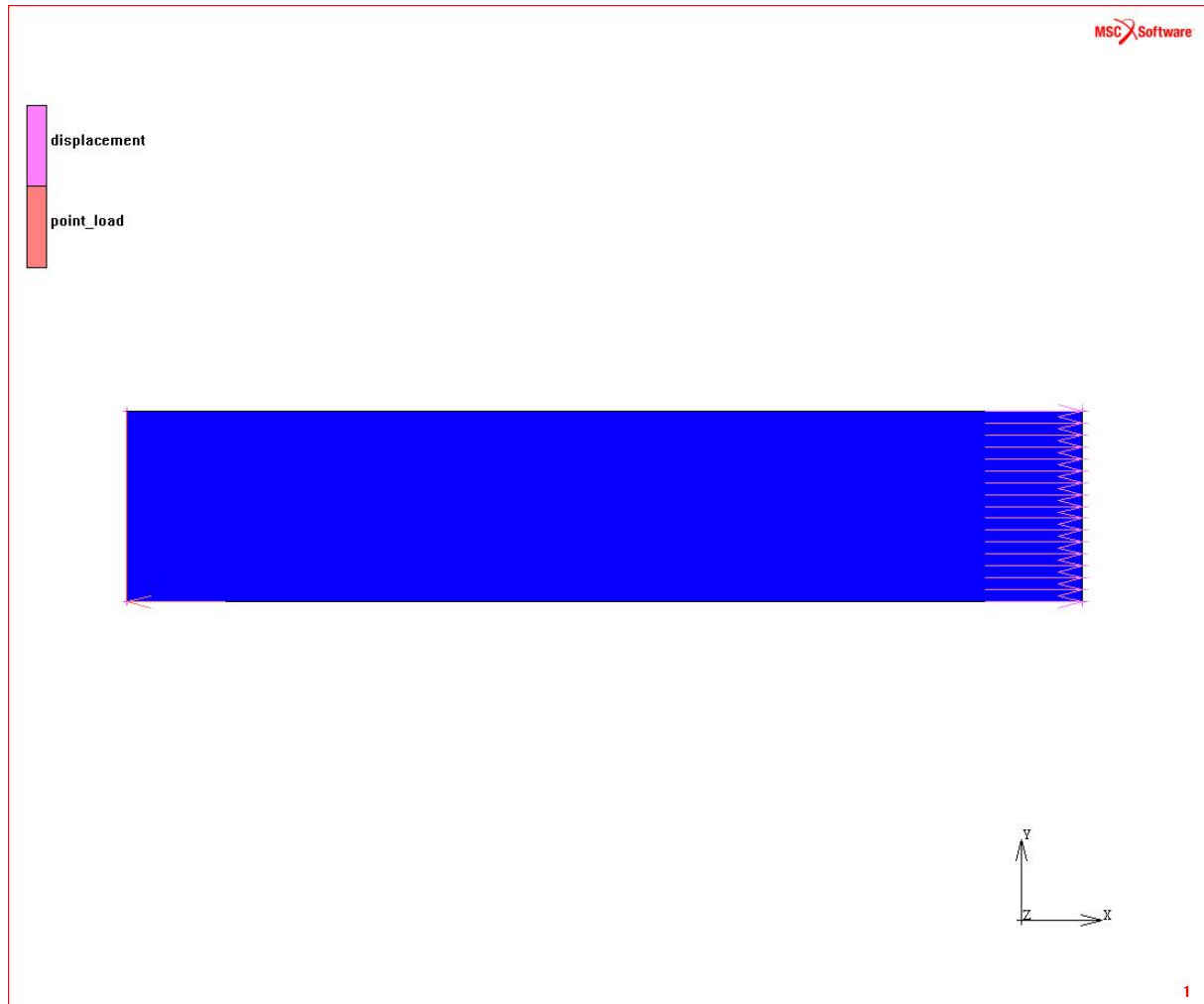


Figur 42, Påførte laster åpen sylinder

Åpen sylinder

Den åpne sylindringen er belastet med et indre trykk på 10 MPa (se figur 42).

Lukket sylinder



Figur 43, Påførte for lukket sylinder

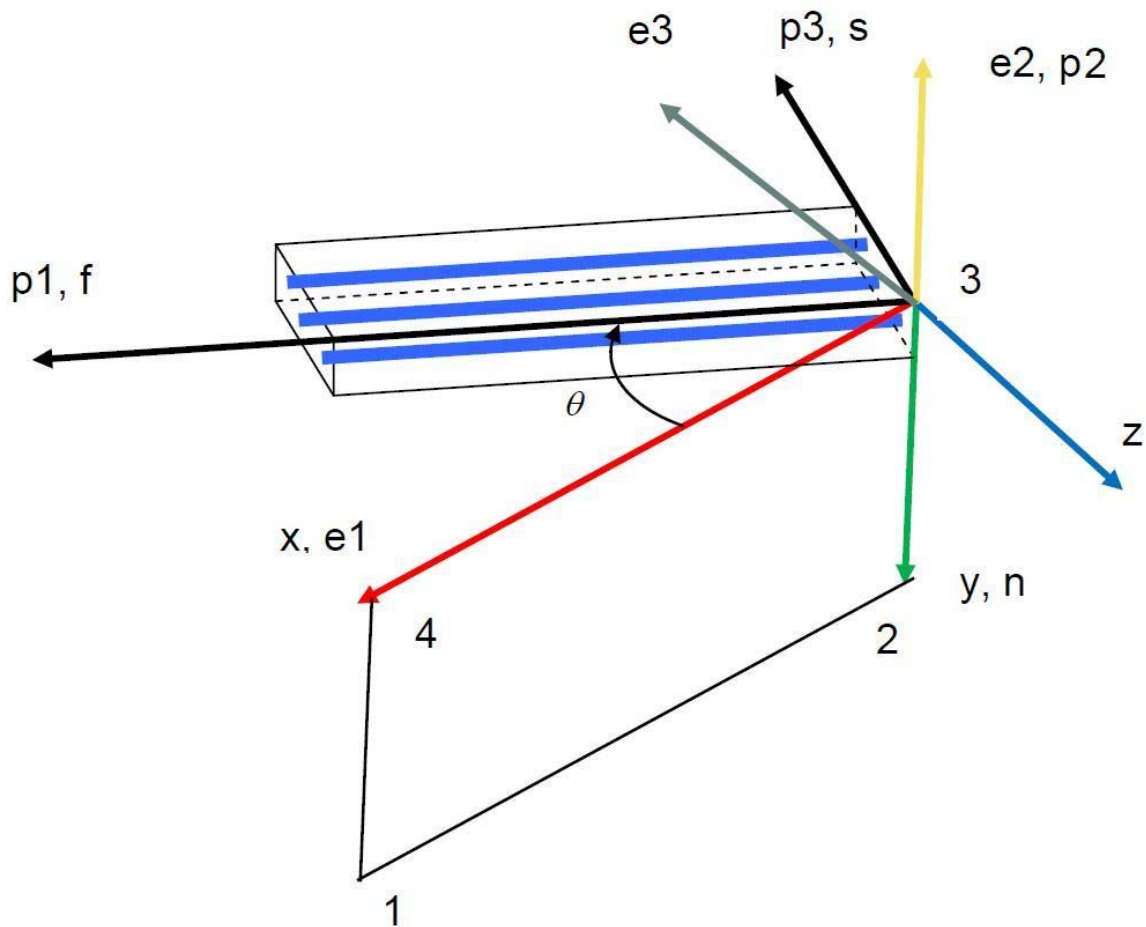
Den lukkede sylindere er belastet med et indre trykk på 10 MPa. I tillegg er det lagt på en ekstra last for å simulere et deksel på venstre side (se figur 43). Lasten er lagt på nederst i venstre hjørne, mens alle nodene langs den vestre kanten er koblet sammen. Det vil si at en punktlast nederst i venstre hjørne vil gi like store deformasjoner på alle nodene som er linket. Lasten er gitt ved

$$F = Ap = \pi r^2 p$$

Det indre trykket er $p=10$ MPa og den indre radiusen er $r=200$ mm. Dette gir da

$$F = \pi \cdot 200^2 \cdot 10 = 1,257 \cdot 10^6 \text{ N}$$

5.2.7 Orientering



Figur 44, Orientering

Som vist i figur 44 er aksene e_1, e_2 og e_3 lokale elementakser, hvor e_1 er materialretningen, e_2 er tykkelsesretningen og e_3 definert som et kryssprodukt av e_1 og e_2 . Aksene p_1, p_2 og p_3 er de foretrukne elementaksene for komposittlementer hentet fra en gitt vinkel θ om e_2 . Aksene f, s og n er de lokale fiberaksene som brukes for kontinuumselementene. Punktene 1, 2, 3 og 4 er elementnodenummer.

Ved bruk av komposittlementer angir man en orientering for elementene og gir dem materialegenskaper i forhold til dette. Deretter angir man vinkelen på fibrene i forhold til de lokale aksene i elementet.

NB! Positiv fiberroteringsvinkel for komposittlementer tilsvarer en negativ fiberroteringsvinkel for kontinuumselementer.

5.3 Resultater fra sylindermode

For å sjekke hvordan kompositt og kontinuumselementene oppfører seg, har vi sammenlignet de med resultater fra analytiske beregninger og det Excel-baserte programmet Laminated tube. Vi har sett på tre forskjellige laminater med fire lag i hvert laminat. $\pm 45/90/\pm 45/90$, $0/90/0/90$ og $\pm 10/90/\pm 30/90$.

De analytiske resultatene er hentet fra "Modeling of a filament-wound composite thin-walled cylinder – axisymmetric model", Thorvaldsen & Osnes [2]

5.3.1 Lagoppbygning 1: [$\pm 45/90/\pm 45/90$]

90	0.5 mm
± 45	0.5 mm
90	0.5 mm
± 45	0.5 mm

Figur 45, Lagoppbygning 1

Dette er en modell som er vanskelig å simulere på grunn av ± 45 -lagene, og kan derfor gi en god pekepinn på hvor gode komposittenelementene er. Lagoppbygningen er gitt i figur 45.

Kontinuumselementer

Tilfelle 1

Resultater for kontinuumselementer under tilfelle 1 (stivhetsmatriser er sammenslått) er gitt i tabell 3-6.

Tabell 3, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
± 45	75	75	62	194	12	59	200	8	59
90	1882	-47	0	1848	-44	0	1840	-46	0
± 45	129	129	58	194	12	59	196	10	59
90	1877	-36	0	1848	-44	0	1830	-44	0

Tabell 4, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Åpen sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
-0,097	2,26	-0,087	2,21	-	-

Tabell 5, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
± 45	869	869	16	1645	99	17	1640	95	17
90	1183	112	0	1155	116	0	1160	112	0
± 45	868	868	16	1645	99	17	1630	97	17
90	1172	114	0	1155	116	0	1150	114	0

Tabell 6, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Lukket sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
0,12	1,37	0,12	0,33	-	-

Tilfelle 2

Resultater for kontinuumselementer under tilfelle 2 (stivhetsmatriser er ikke sammenslått) er gitt i tabell 7-10.

Tabell 7, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
± 45	142	4	62	194	12	59	200	8	59
90	1884	-47	0	1848	-44	0	1840	-46	0
± 45	246	12	58	194	12	59	196	10	59
90	1878	-36	0	1848	-44	0	1830	-44	0

Tabell 8, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Åpen sylinder, forskyvninger (MPa)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
-0,096	2,26	-0,087	2,21	-	-

Tabell 9, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
± 45	1645	96	16	1645	99	17	1640	95	17
90	1183	112	0	1155	116	0	1160	112	0
± 45	1641	97	16	1645	99	17	1630	97	17
90	1172	114	0	1155	116	0	1150	114	0

Tabell 10, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Lukket sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
0,12	1,37	0,12	0,33	-	-

Komposittlementer

Tilfelle 1

Resultater for komposittlementer under tilfelle 1 (stivhetsmatriser er sammenslått) er gitt i tabell 11-14.

Tabell 11, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
± 45	146	5	62	194	12	59	200	8	59
90	1880	-47	0	1848	-44	0	1840	-46	0
± 45	246	13	58	194	12	59	196	10	59
90	1874	-36	0	1848	-44	0	1830	-44	0

Tabell 12, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Åpen sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
-0,097	2,26	-0,087	2,21	-	-

Tabell 13, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
± 45	1643	96	16	1645	99	17	1640	95	17
90	1182	112	0	1155	116	0	1160	112	0
± 45	1640	97	16	1645	99	17	1630	97	17
90	1172	114	0	1155	116	0	1150	114	0

Tabell 14, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Lukket sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
0,12	1,37	0,12	0,33	-	-

Tilfelle 2

Resultater for kontinuumselementer under tilfelle 2 (stivhetsmatriser er ikke sammenslått) er gitt i tabell 15-18.

Tabell 15, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
± 45	146	5	62	194	12	59	200	8	59
90	1880	-47	0	1848	-44	0	1840	-46	0
± 45	247	13	58	194	12	59	196	10	59
90	1874	-36	0	1848	-44	0	1830	-44	0

Tabell 16, $\pm 45/90/\pm 45/90$ Åpen sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
-0,097	2,26	-0,087	2,21	-	-

Tabell 17, Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
± 45	1643	96	16	1645	99	17	1640	95	17
90	1182	112	0	1155	116	0	1160	112	0
± 45	1639	97	17	1645	99	17	1630	97	17
90	1172	114	0	1155	116	0	1150	114	0

Tabell 18, Lukket sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
0,12	1,37	0,12	0,33	-	-

Diskusjon

Først kan vi konkludere med at det er samsvar mellom de analytiske beregningene og resultatene fra Laminated tube. Med andre ord er Laminated tube velegnet til å beregne spenninger på tynnveggede sylindere.

Kontinuumselementene gir gode resultater for alle 90-lagene i forhold til Laminated tube og analytiske beregninger. For 45-lagene er det en del variasjon.

For åpen sylinder med sammenslåtte stivhetsmatriser er det riktige skjærspenninger, men for spenningene i fiberretningen og på tvers av fiberretningen stemmer det ikke. Åpen sylinder med separate vinkler gir også riktige skjærspenninger, men ikke korrekte spenninger hverken i fiberretningen eller på tvers av fiberretningen.

For lukket sylinder med sammenslåtte stivhetsmatriser er det riktige skjærspenninger, men spenningen i fiberretning er ca. halvparten av det de skal være. Spenningene på tvers av fiberretningen er også altfor store. Lukket sylinder med separate vinkler gir veldig gode resultater for alle spenningene.

Når det gjelder radiell og aksiell utvidelse, foreligger det gode resultater for de åpne sylindrene. De lukkede sylindrene har gode resultater for aksiell utvidelse, men altfor høye verdier for radiell utvidelse.

Komposittlementene gir gode resultater for alle 90 lagene.

For åpen sylinder med sammenslåtte stivhetsmatriser, er resultatene for skjærspenning og spenning på tvers av fibre gode. Resultatene for spenningen i fiberretningen er for lave. For åpen sylinder med separate stivhetsmatriser får vi akkurat de samme resultatene.

For lukket sylinder er resultatene gode både for sammenslåtte og separate stivhetsmatriser. Det ser ut som det er likegyldig om man bruker sammenslåtte eller separate stivhetsmatriser for komposittlementene.

Når det gjelder radiell og aksiell utvidelse, er det gode resultater for de åpne sylindrene. De lukkede sylindrene har gode resultater for aksiell utvidelse, men altfor høye verdier for radiell utvidelse

5.3.2 Lagoppbygning 2: [0/90/0/90]

90	0.5 mm
0	0.5 mm
90	0.5 mm
0	0.5 mm

Figur 46, Lagoppbygning 2

Her er det ingen forskjell på separate og sammenslåtte stivhetsmatriser da orienteringen er 0° og 90° . Lagoppbygningen er gitt i figur 46.

Kontinuumselementer

Resultater for kontinuumselementer er gitt i tabell 19-22.

Tabell 19, 0/90/0/90 Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
0	-2	88	0	-25	90	0	-24	86	0
90	1949	22	0	1920	25	0	1920	22	0
0	-43	89	0	-25	90	0	-22	88	0
90	1936	22	0	1920	25	0	1910	24	0

Tabell 20, 0/90/0/90 Åpen sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
-0,009	2,33	-0,003	2,26		

Tabell 21, 0/90/0/90 Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
0	924	100	0	936	102	0	928	99	0
90	1942	67	0	1908	70	0	1910	66	0
0	927	101	0	936	102	0	930	100	0
90	1928	69	0	1908	70	0	1890	68	0

Tabell 22, 0/90/0/90 Lukket sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
0,053	2,29	0,053	2,23	-	-

Komposittlementer

Resultater for kontinuumselementer er gitt i tabell 23-26.

Tabell 23, 0/90/0/90 Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
0	-3	88	0	-25	90	0	-24	86	0
90	1949	22	0	1920	25	0	1920	22	0
0	-43	89	0	-25	90	0	-22	88	0
90	1937	22	0	1920	25	0	1910	24	0

Tabell 24, 0/90/0/90 Åpen sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
-0,009	2,33	-0,003	2,26		

Tabell 25, 0/90/0/90 Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
0	924	100	0	936	102	0	928	99	0
90	1941	67	0	1908	70	0	1910	66	0
0	927	101	0	936	102	0	930	100	0
90	1928	69	0	1908	70	0	1890	68	0

Tabell 26, Lukket sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
0,053	2,29	0,053	2,23	-	-

Diskusjon

Kontinuumselementene gir gode resultater for lukket sylinder, men for åpen sylinder er spenningene i fiberretningen ikke riktige. Resultatene for aksiell og radiell utvidelse stemmer godt overens med resultatene fra analytisk beregning.

Komposittlementene gir også gode resultater for lukket sylinder, men for åpen sylinder er spenningene i fiberretningen heller ikke riktige. Resultatene for aksiell og radiell utvidelse stemmer, som hos kontinuumselementene, godt overens med resultatene fra analytisk beregning.

5.3.3 Lagoppbygning 3: [$\pm 10/90/\pm 30/90$]

90	0.5 mm
± 30	0.5 mm
90	0.5 mm
± 10	0.5 mm

Figur 47, Lagoppbygning 3

Dette er kanskje det mest realistiske eksempelet med ulike helical-lag (± 10 og ± 30). Lagoppbygningen er gitt i figur 47.

Kontinuumselementer

Tilfelle 1

Resultater for kontinuumselementer under tilfelle 1 (stivhetsmatriser er sammenslått) er gitt i tabell 27-30.

Tabell 27, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
± 10	-30	80	20	-215	83	13	213	79	13
90	1919	8	0	1898	12	0	1900	10	0
± 30	49	80	26	264	67	34	265	65	33
90	1902	-11	0	1898	12	0	1880	12	0

Tabell 28, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Åpen sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
-0,053	2,42	-0,018	2,24	-	-

Tabell 29, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
± 10	936	147	144	1005	95	5	998	91	5
90	1794	67	0	1762	70	0	1760	66	0
± 30	761	501	225	1177	89	12	1170	87	12
90	1782	69	0	1762	70	0	1750	68	0

Tabell 30, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Lukket sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
0,053	2,11	0,056	2,06	-	-

Tilfelle 2

Resultater for kontinuumselementer under tilfelle 2 (stivhetsmatriser er ikke sammenslått) er gitt i tabell 3-6.

Tabell 31, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
± 10	11	83	10	-215	83	13	213	79	13
90	1919	8	2	1898	12	0	1900	10	0
± 30	64	63	36	264	67	34	265	65	33
90	1902	-12	2	1898	12	0	1880	12	0

Tabell 32, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Åpen sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
-0,054	2,42	-0,018	2,24	-	-

Tabell 33, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
± 10	990	91	5	1005	95	5	998	91	5
90	1795	67	0	1762	70	0	1760	66	0
± 30	1175	88	13	1177	89	12	1170	87	12
90	1782	69	0	1762	70	0	1750	68	0

Tabell 34, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Lukket sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
0,055	2,12	0,056	2,06	-	-

Komposittlementer

Tilfelle 1

Resultater for komposittlementer under tilfelle 1 (stivhetsmatriser er sammenslått) er gitt i tabell 35-38.

Tabell 35, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
± 10	-54	83	12	-215	83	13	213	79	13
90	1923	8	0	1898	12	0	1900	10	0
± 30	63	60	38	264	67	34	265	65	33
90	1906	-11	0	1898	12	0	1880	12	0

Tabell 36, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Åpen sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
0,053	2,42	-0,018	2,24	-	-

Tabell 37, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
± 10	990	93	5	1005	95	5	998	91	5
90	1793	67	0	1762	70	0	1760	66	0
± 30	1173	88	13	1177	89	12	1170	87	12
90	1781	69	0	1762	70	0	1750	68	0

Tabell 38, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Lukket sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
0,053	2,11	0,056	2,06	-	-

Tilfelle 2

Resultater for komposittlementer under tilfelle 2 (stivhetsmatriser er ikke sammenslått) er gitt i tabell 39-42.

Tabell 39, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Åpen sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
± 10	-41	83	-12/0/12	-215	83	13	213	79	13
90	1922	8	0	1898	12	0	1900	10	0
± 30	63	60	-39/0/37	264	67	34	265	65	33
90	1906	-11	0	1898	12	0	1880	12	0

Tabell 40, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Åpen sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
0,053	2,42	-0,018	2,24	-	-

Lukket sylinder, separate vinkler, alle spenninger i MPa

Tabell 41, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Lukket sylinder, spenninger i planet (MPa)

Orientering	Marc			Analytisk			Laminated Tube		
	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
± 10	990	93	5	1005	95	5	998	91	5
90	1793	67	0	1762	70	0	1760	66	0
± 30	1173	88	12	1177	89	12	1170	87	12
90	1781	69	0	1762	70	0	1750	68	0

Tabell 42, $\pm 10/90/\pm 30/90$ Lukket sylinder, forskyvninger (mm)

Marc		Analytisk		Laminated tube	
Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell	Aksiell	Radiell
0,055	2,11	0,056	2,06	-	-

Diskusjon

Spenningsene i 90 lagene er, som for de andre lagoppbygningene, korrekte. Bortsett fra spenningen på tvers av fibre i det øverste 90 laget i de åpne sylindrene.

Kontinuumselementene i kombinasjon med åpen sylinder og sammenslåtte stivhetsmatriser gir gode resultater for skjærspenningen og for spenningen på tvers av fibre. Spenningen i fiberretningen er for lav. Det samme er tilfelle for åpen sylinder med separate stivhetsmatriser. Lukket sylinder med sammenslåtte stivhetsmatriser gir for høye skjærspenninger og spenninger på tvers av fibre, men for lave spenninger i fiberretningen. Lukket sylinder med separate stivhetsmatriser gir veldig gode resultater for alle spenningene.

Kontinuumselementene gir gode resultater for aksiell og radiell utvidelse i lukket sylinder. For den åpne sylindren er den aksielle lengdeendringen litt for stor.

Komposittlementene i åpen sylinder med sammenslåtte stivhetsmatriser gir gode resultater for skjærspenning og spenning på tvers av fibre. Spenningen i fiberretningen er for liten. Separate vinkler gir så å si de samme resultatene. De lukkede sylindrene med komposittlementer gir veldig gode resultater.

De aksielle og radielle utvidelsene for lukket sylinder stemmer godt overens med de analytiske beregningene. For åpne sylindere er de aksielle verdiene for høye.

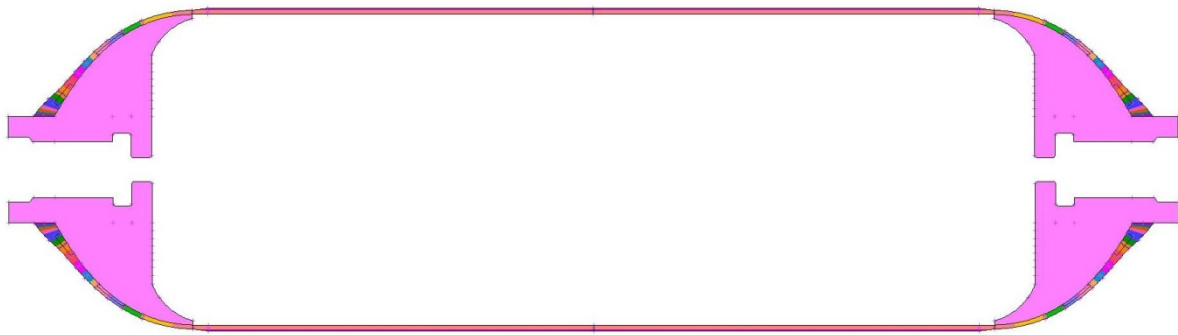
5.3.4 Oppsummering

De analytiske beregningene og resultatene fra Laminated tube stemmer godt overens.

Generelt sett er det de lukkede sylindrene som gir de beste resultatene for både kompositt- og kontinuumselementene. For komposittlementene har det ikke noe å si om stivhetsmatrisene er separate eller sammenslått. Hos kontinuumselementene er det de separate vinklene som gir de mest korrekte resultatene.

Vi ser av resultatene at det fint går an å bruke komposittlementene så lenge konstruksjonen er lukket. 4-toms flasken som modelleres og simuleres er lukket så jeg kan bruke både kompositt- og kontinuumselementer.

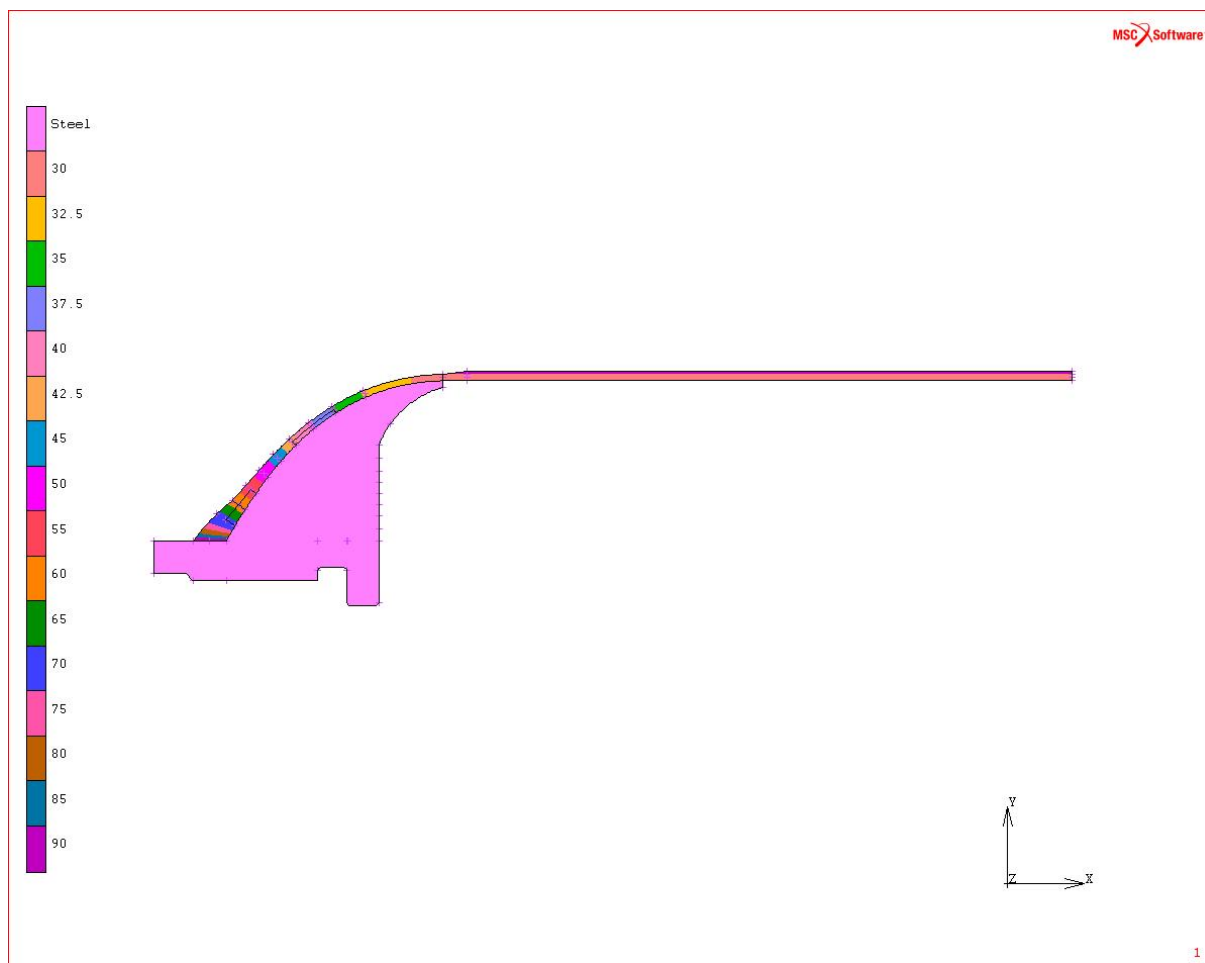
5.4 4-toms XX0-flaske



Figur 48, 4-tomsflaske

Denne flasken har en diameter på 4 tommer (se figur 48) og er bygd opp av to helical-lag (30°) og et hoop-lag (90°). Modellen er aksesymmetrisk og vil bli modellert både med kompositt- og kontinuumselementer.

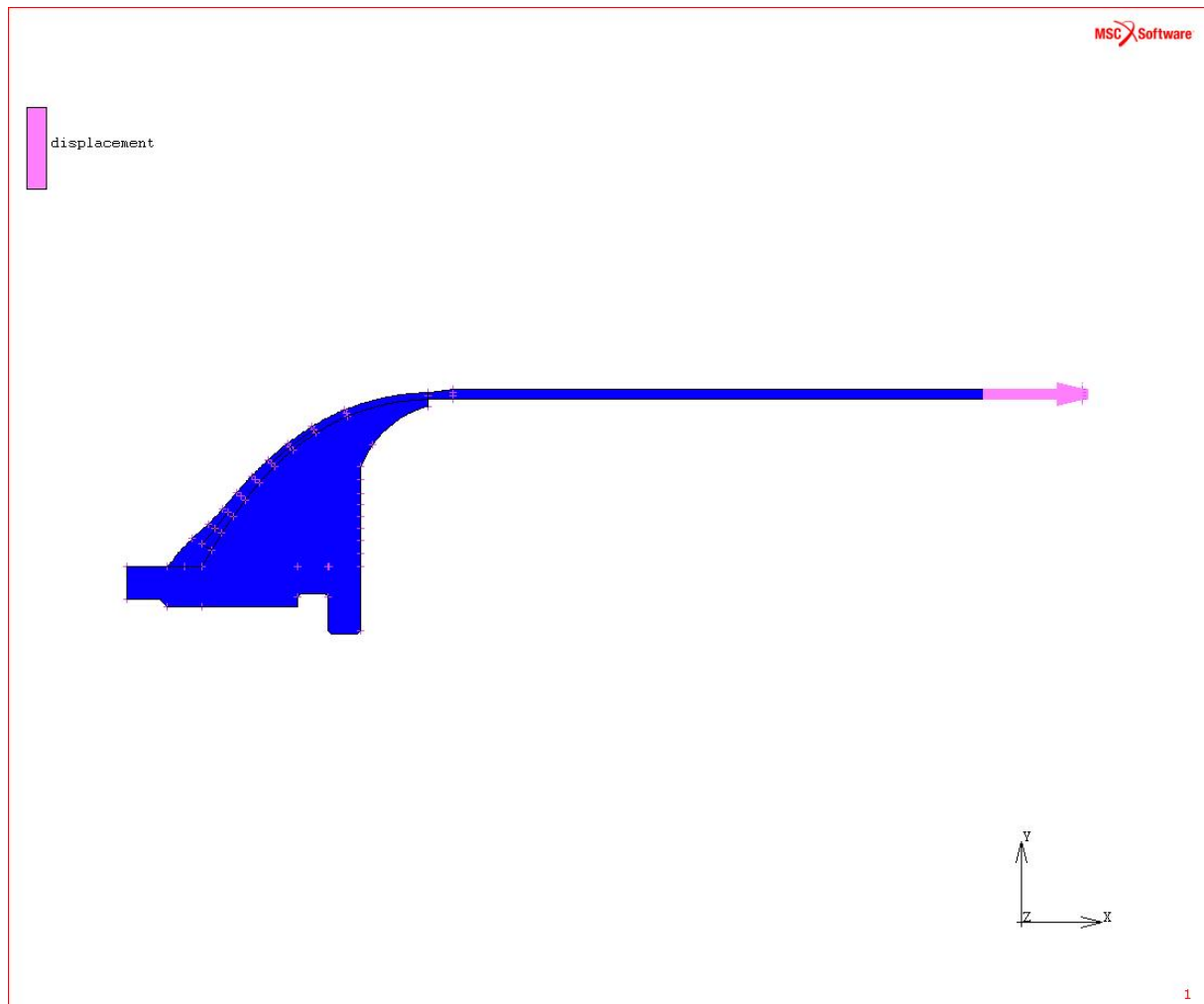
5.4.1 Geometri



Figur 49, Geometri 4-tomsflaske

4-tomsflasken består av to deler, et endestykke i metall og et komposittskall. Formen på metallendestykket er geodesisk der kompositten og metallet er i kontakt. Metallringen er farget lilla, mens kompositten endrer farge etter fiberorienteringen (se figur 44).

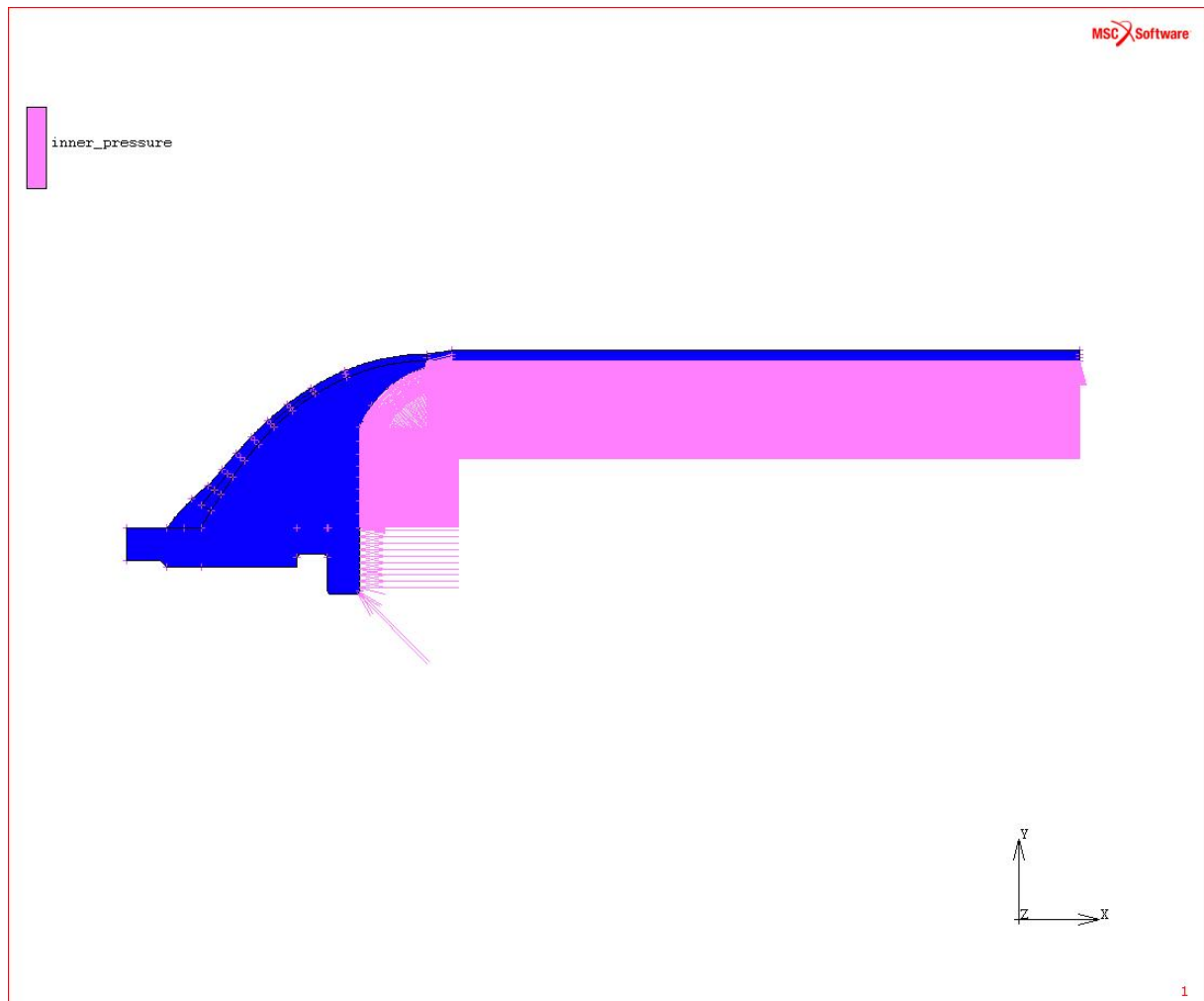
5.4.2 Randbetingelser



Figur 50, Randbetingelser 4-tomsflaske

Modellen har symmetriakse i venstre kant. Der er den fastlåst i aksial retning (x-retning) og ut av planet (z-retning). Dette betyr at den kan forskyve seg i radiell retning (y-retning).

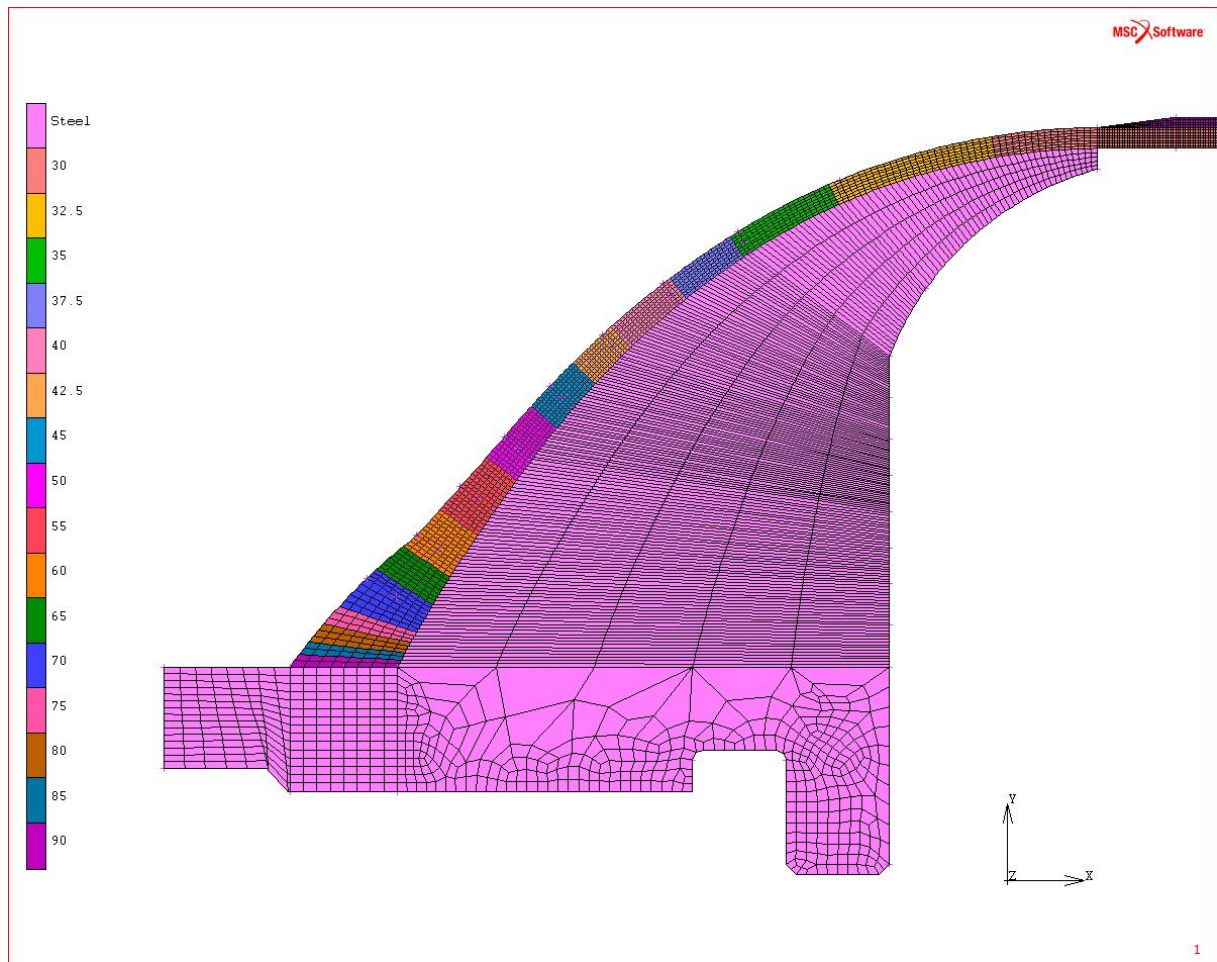
5.4.3 Påførte laster



Figur 51, Påførte laster 4-tomsflaske

Konstruksjonen er belastet med et indre trykk på 10 MPa for å kunne sammenlikne med eksperimentelle tester. For å teste modellen under sprengtrykk vil den indre lasten bli satt til 36 MPa.

5.4.4 Materialegenskaper



Figur 52, Materialegenskaper 4-tomsflaske

Metallendestykket har materialegenskaper for stål. Fiberkompositten endrer orientering over domen og er derfor gitt forskjellige egenskaper ut i fra dette. Materialparametrene som er benyttet, er gjengitt i tillegg A.

For komposittelementene er det oppgitt egenskaper for et ortotropt materiale med orientering 0° . Videre er det oppgitt vinkel for de andre orienteringene og Marc Mentat kalkulerer stivhetsmatrisene.

For kontinuumselementene blir alle stivhetsmatrisene regnet ut på forhånd (i MatLab), og lagt inn manuelt som anisotrope materialer.

5.4.5 Komposittlementer

Komposittlementene vil ha sammenslåtte stivhetsmatriser da dette er raskere å modellere og testene viser at det ikke har noen innvirkning på resultatene.

5.4.6 Kontinuumselementer

Kontinuumselementene vil ha separate stivhetsmatriser da testene viser at dette gir de mest korrekte verdiene.

6 Resultater

Her er resultatene fra trykktesting og simulering av 4-tomsflaskene samlet. Disse vil bli sammenlignet og diskutert senere i kapitlet.

6.1 Trykktesting

Alle flaskene ble to ganger kjørt opp til et trykk på 100 bar, og målt etter hver gang. Deretter ble det kjørt opp til sprengtrykk der flasken ble ødelagt.

Gjennomsnitt av de 8 flaskene uavhengig av temp, fiberstrekk og peelply-strekk ser du i tabell 43.

Tabell 43, Resultater fra trykktesting

Runde	Trykk (bar)	Lengdeutvidelse (mm)	Omkretsøkning (mm)	Radiusøkning (mm)
1	100	0,65	1,35	0,43
2	100	0,61	1,35	0,43
Sprengtrykk 361,49 (bar)				

6.2 4-tomsmodell

6.2.1 Indre trykk på 10 MPa

Først er det gitt en indre trykk på 10 MPa (100 bar) som skal tilsvare det trykket som blir påført under kvalitetstesting av 4-tomsflaskene. Resultatene er gitt i tabell 44-46.

Tabell 44, Lengdeutvidelse ved indre trykk på 10 MPa, alle verdier i mm

	Komposittlementer	Kontinuumselementer	Trykktesting
Aksiell	0,21	0,22	0,65
Radiell	0,25	0,24	0,43

Tabell 45, Kontinuumselementer, spenninger i planet ved indre trykk på 10 MPa, alle verdier i MPa

Orientering	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
30	297	30	11
30	294	30	11
90	790	15	0

Tabell 46, Komposittlementer, spenninger i planet ved indre trykk på 10 MPa, alle verdier i MPa

Orientering	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}
30	296	31	11
30	293	31	11
90	796	15	0

6.2.2 Indre trykk på 36 MPa

Deretter er det gitt et indre trykk på 36 MPa (360 bar) som tilsvarer gjennomsnittet av det trykket 4-tomsflaskene røk ved, under sprengtesting. Resultatene er gitt i tabell 47-49.

Tabell 47, Lengdeutvidelse ved indre trykk på 36 MPa, alle verdier i mm

	Komposittlementer	Kontinuumselementer	Trykktesting
Aksiell	0,7	*	*
Radiell	0,9	*	*

Tabell 48, Kontinuumselementer, spenninger i planet ved indre trykk på 36 MPa, alle verdier i MPa

Orientering	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}
30	*	*	*
30	*	*	*
90	*	*	*

Tabell 49, Komposittlementer, spenninger i planet ved indre trykk på 36 MPa, alle verdier i MPa

Orientering	σ_{11}	σ_{33}	σ_{31}
30	1081	113	40
30	1070	112	39
90	2926	55	0

* Ingen resultater

6.3 Diskusjon

Ved et indre trykk på 10 MPa gir kompositt- og kontinuumselementer ganske like svar, men disse stemmer ikke overens med resultatene fra kvalitetstesting. Modellene ga ganske like svar på aksial og radiell utvidelse, mens kvalitetstesting viste at den aksiale utvidelsen var ca. 50 prosent høyere enn den radielle utvidelsen.

Spenningene i planet ved et indre trykk på 10 MPa ga ingen betydelige forskjeller mellom kompositt- og kontinuumselementene. Dette var som ventet etter resultatene fra sylindermødelene.

Ved et indre trykk på 36 MPa var det kun modellen med komposittlementer som ga resultater. Vi har ingen eksperimentelle data for lengdeutvidelse ved dette trykket så disse resultatene får vi ikke sammenliknet med noe.

Modellen med kontinuumselementer ga heller ingen svar for spenningene ved indre trykk på 36 MPa. Men tallene oppnådd i modellen med komposittlementer ser ganske fornuftige ut

hvis vi sammenlikner med resultatene til en 30/90/30/90 flaske simulert i [8]. Vi har ikke fått sett på bruddanalyse av 4-tomsflasken.

7 Konklusjon og videre forskning

Her følger en oppsummering og konklusjon. Vi vil også gå inn på forslag til videre arbeid

7.1 Konklusjon

I denne oppgaven var vi interessert å lage en god og enkel modell for analyse av 4-tomsflasker i kompositt. For å oppnå dette måtte vi sammenligne den aktuelle programvaren (Marc Mentat) med andre sikrere metoder. Vi sammenliknet derfor resultatene med analytiske beregninger og med Laminated tube. En tynnvegget sylinder, åpen og lukket, ble benyttet for å kunne anvende numeriske beregninger. Innenfor Marc Mentat sammenliknet vi kontinuums- og komposittelementer både med og uten sammenslåtte stivhetsmatriser.

Vi fant ut at resultatene ble best for lukkede sylindere. Vi fant også ut at det ikke spilte noen rolle om stivhetsmatrisene var sammenslått eller ikke når det kom til komposittelementer. Det som da viste seg å være de beste modellene var kontinuumselementer uten sammenslåtte stivhetsmatriser og komposittelementer med sammenslåtte stivhetsmatriser da dette var raskere å modellere.

De modellerte 4-tomsflaskene ga ingen gode resultater for lengdeutvidelse, da de viste for liten verdi. Men for spenninger i planet ved et indre trykk på 10 MPa ga kompositt- og kontinuumselementene like resultater. Modellen med kontinuumselementer ville ikke kjøre ved et indre trykk på 36 MPa, derfor fikk vi bare resultatene for modellen med komposittelementer. Disse viste imidlertid å være fornuftige. Det er ikke gjort noen bruddanalyse av 4-tomsflasken.

7.2 Videre forskning og arbeid

Ut fra de resultater som er oppnådd og de erfaringer som er gjort, er det fortsatt en del ting som burde bli belyst. Under er det listet opp en rekke forslag til hva som kan gjøres av videre arbeid.

Det første som bør gjøres er å få modellen med kontinuumselementer til å kjøre ved et indre trykk på 36 MPa. Videre hadde det vært interessant å gjøre en bruddanalyse av 4-tomsflasken med komposittelementer.

7.2.1 Elementinndeling

I denne oppgaven har det ikke vært fokusert på finheten i elementinndelingen. Det hadde vært interessant å finne ut hvor mange elementer som er nødvendige for å gjengi riktige spenninger med komposittlementer.

7.2.2 Oppdeling av orientering over domen

Orienteringen til komposittet varierer over domen. Det hadde vært interessant å se hvor nøyaktig denne variasjonen må gjengis for å oppnå riktige spenninger og deformasjoner

7.2.3 Fullskalamodell

Det hadde vært nyttig å lage en modell av en fullskala rakettmotor for å se om denne oppfører seg på samme måte som en 4-tomsflaske.

7.2.4 3D-modell

Med en aksesymmetrisk modell må man gjøre en del antagelser og forenklinger. Dette gjør det vanskelig å få tilfredsstillende resultater ved kompliserte tilfeller. Det hadde vært interessant å se på en liten del av en 3D-modell for å se om den regner med andre parametere enn en aksesymmetrisk modell gjør.

Litteraturliste

- [1] "Analysis and performance of fiber composites" third edition. Agarwal, Broutman & Chandrashekhara
- [2] "Modeling of a filament-wound composite thin-walled cylinder – axisymmetric modell". Tom Thorvaldsen & Harald Osnes
- [3] "Rakettligningen". Gunnar Stette, Narom
- [4] "An introduction to numerical modeling of the front end of a rocket motor case". Tom Thorvaldsen FFI
- [5] "Concepts and applications of finite element analysis" fourth edition. Cook, Malkus, Plesha & Witt
- [6] "User documentation for MSC. Marc Mentat version 2010". MSC Software
- [7] "A numerical Model of the Viscosity of an Epoxy Prepreg Resin System". R.P. Theriault, T.A. Osswald
- [8] "Modelling of carbon fibre filament-wound composite pressure vessels". Tom Thorvaldsen FFI
- [9] "Effects of the impregnation die geometry on the roving tension and laminate quality during filament winding". A. Miaris, M. Paessler, R. Schledjewski
- [10] "Geodesic". Mathematica help file
- [11] "Vikling av fiberkompositter". Aage Lystrup
- [12] "Stress-strain modelling in wound laminates under processing conditions". H. Faria, V.Gomes, F. M. Pires, A. T. Marques
- [13] "Design of filament-wound domes based on continuum theory and non-geodesic roving trajectories". Lei Zu, Sotiris Koussios, Adriaan Beukers

[14] “Toward a constitutive model for cure-dependent modulus of a high temperature epoxy during the cure”. M. Zarrelli, A. A. Skordos, I. K. Partridge

Vedlegg A Materialverdier

Materialegenskaper	Verdi	Enhet
E_{11}	170000	MPa
E_{22}	8000	MPa
E_{33}	8000	MPa
G_{12}	3000	MPa
G_{23}	2564	MPa
G_{13}	3000	MPa
ν_{12}	0.3	
ν_{13}	0.3	
ν_{23}	0.4	
ν_{21}	0.0141	
ν_{32}	0.4	
ν_{31}	0.0141	
$\sigma_{11,t}^*$	2400	MPa
$\sigma_{11,c}^*$	1600	MPa
$\sigma_{22,t}^*$	50	MPa
$\sigma_{22,c}^*$	150	MPa
$\sigma_{33,t}^*$ (antatt verdi)	100	MPa
$\sigma_{33,c}^*$ (antatt verdi)	100	MPa
τ_{12}^*	85	MPa
τ_{23}^*	85	MPa
τ_{31}^*	50	MPa

Vedlegg B Marc Mentat input fil

I denne oppgaven er det benyttet mange Python script. På grunna av lengden på disse er det kun gjengitt et av scriptene.

```
# This is the Python script including the commands needed for running
# the "four_inch_bottle_1" case using the Mentat GUI.
#
# DESIGN: Structural analysis of the forward closure of the IRIS-T SL rocket
# motor
# DESIGN # 1
# TASK:
#
# REMARKS:
#
# User subroutines (for 64 bits machines):
# The user subroutines are included from command line input:
# 1) Build an enviroment for 64 bits (alternativly 32 bits); open a shell
# 2) Move to the directory where the job is to be run
# 3) Run a job within Mentat, without the user subroutine to generate
#   a job file; called 'modell1_job1' in the input file to avoid a lot
#   of job files in the directory
# 4) Make sure that the Fortran user subroutine files are stored in
#   the same directory (to avoid including file paths)
# 5) >> run_marc -j modell1_job1 -user plotv -save yes -ba n
#
# Here: -j <model_name>
#       -user <fortran_user_subroutine_file> (without suffix!)
#       -save <yes: saves the plotv.exe file for later use> (no is default!)
```

```

# - ba <y/n> ( do not run job in back ground)
#
# Next runs (if not altering the user subroutine files):
# >> run_marc -prog plotv -j model1_job1 -ba n
#
# Here: -prog <executable file> (plotv.exe - without the suffizx!)
#
# More options/details may be found in the "Installation and
# Operations Guide"
#
# VERSION: MarcMentat 2010
#
#
# Usage:
# 1) Start the Mentat GUI
# 2) Click: UTILS -> PYTHON -> RUN
# 3) Select the Python file:
# z:\Rakettsimulering\DEA5212\fourinch_bottle\Simulering\Pythonfiler\four_inch_bottle_1.py
# 4) Click: OK
#
# Author: Tom Thorvaldsen, FFI, February 2010
# Edited by Oyvind Welgaard, 2011

# Needed for access to the PyMentat module:
from py_mentat import *
from math import *
#import re

```

```
# Open a new model and save it in the directory "path_name":
```

```
def open_new_model(model_name,path_name):
```

```
    # Close post processor:
```

```
    py_send("*post_close")
```

```
    # Reset all options in Mentat to default values:
```

```
    py_send("*reset")
```

```
    #Open a new model:
```

```
    py_send("*new_model")
```

```
    py_send("yes")    # okay to delete current job
```

```
    # File name is automaticly given the extension ".mud"
```

```
    file_name = path_name + model_name
```

```
    py_send("save_as_model %s yes" %file_name)
```

```
    return
```

```
# ----- GEOMETRY -----
```

```
# Import composite mesh file and make sets:
```

```
def import_composite_file(file):
```

```
    py_send("*import patran %s" % file)
```

```
    py_send("*fill_view")
```

```
    py_send("*elements_solid")
```

```

py_send("*regenerate")

py_send("*set_sweep_tolerance ")
py_send("0.001 ")
py_send("*sweep_nodes")
py_send("all_visible")
py_send("*renumber_all ")

# Select all elements and store them in SET "hoop_outer":
py_send("*select_elements")
py_send("all_visible")
py_send("*store_elements composite")
py_send("all_selected")
py_send("*select_clear")

py_send("*identify_sets *regen")

# Save model:
py_send("*save_model ")

# ----- MATERIAL PROPERTIES -----

# Set material properties:
def material_properties(failure_type,progressive_failure):

```

```

cfrp_0_material(failure_type,progressive_failure)

HELICAL_material(failure_type,progressive_failure)

HELICALL_material(failure_type,progressive_failure)

HOOP_material(failure_type,progressive_failure)


# Show the different materials

py_send("*identify_materials *regen")


# Save model:

py_send("*save_model")


def cfrp_0_material(failure_type,progressive_failure):

    mat_name = "CFRP_0"


    py_send("*new_mater standard")
    py_send("*mater_option general:state:solid")
    py_send("*mater_name")
    py_send("%s" % mat_name)
    py_send("*mater_option general:state:solid")
    py_send("*mater_option structural:type:elast_plast_ortho")
    py_send("*mater_param structural:youngs_modulus1 0170000")
    py_send("*mater_param structural:youngs_modulus2 08000")
    py_send("*mater_param structural:youngs_modulus3 08000")
    py_send("*mater_param structural:poissons_ratio12 0.3")
    py_send("*mater_param structural:poissons_ratio23 0.4")
    py_send("*mater_param structural:poissons_ratio31 0.0141")
    py_send("*mater_param structural:shear_modulus12 03000")

```

```

py_send("*mater_param structural:shear_modulus23 02564")

py_send("*mater_param structural:shear_modulus31 03000")

py_send("*mater_param general:mass_density 00.00155")


if (failure_type == "max_stress"):

    py_send("*material_type damage:failure")

    # Max stress criterion:

    # Values referred to the element preferred axes:

    sig_x_t = 2400.0

    sig_x_c = 1600.0

    sig_y_t = 50.0

    sig_y_c = 150.0

    sig_z_t = 100.0

    sig_z_c = 100.0

    sig_xy = 85.0

    sig_yz = 85.0

    sig_zx = 50.0


py_send("*material_option failure:criterial:max_stress")

py_send("*material_value failure:max_tensile_stress_x")

py_send("%f" % sig_x_t)

py_send("*material_value failure:max_compressive_stress_x")

py_send("%f" % sig_x_c)

py_send("*material_value failure:max_tensile_stress_y")

py_send("%f" % sig_y_t)

py_send("*material_value failure:max_compressive_stress_y")

py_send("%f" % sig_y_c)

py_send("*material_value failure:max_tensile_stress_z")

```



```

py_send("%f" % sig_z_t)

py_send("*material_value failure:max_compressive_stress_z")

py_send("%f" % sig_z_c)

py_send("*material_value failure:max_shear_stress_xy")

py_send("%f" % sig_xy)

py_send("*material_value failure:max_shear_stress_yz")

py_send("%f" % sig_yz)

py_send("*material_value failure:max_shear_stress_zx")

py_send("%f" % sig_zx)

if (progressive_failure == "on"):

    py_send("*material_option failure:progressive:on")

else:

    py_send("*material_option failure:progressive:off")

def HELICAL_material(failure_type,progressive_failure):

    mat_name = "10"

    py_send("*new_mater composite")

    py_send("*mater_option general:state:solid")

    py_send("*material_name")

    py_send("%s" % mat_name)

    py_send("*mater_append_submat CFRP_0")

    py_send("*mater_submat_param 1 general:compos_ply_thick_percent 50")

    py_send("*mater_submat_param 1 general:compos_ply_orient_angle_deg -10")

    py_send("*mater_append_submat CFRP_0")

    py_send("*mater_submat_param 2 general:compos_ply_thick_percent 50")

```

```

py_send("*mater_submat_param 2 general:compos_ply_orient_angle_deg 10")

# Element list

py_send("*add_material_elements")

py_send("1 2 17 18 33 34 49 50 65 66 81 82 97 98 113 114 129 130 145 146 161 162 177 178")
py_send("193 194 209 210 225 226 241 242 257 258 273 274 289 290 305 306 321 322 337 338")
py_send("353 354 369 370 385 386 401 402 417 418 433 434 449 450 465 466 481 482 497 498")
py_send("513 514 529 530 545 546 561 562 577 578 593 594 609 610 625 626 641 642 657 658")
py_send("673 674 689 690 705 706 721 722 737 738 753 754 769 770 785 786 801 802 817 818")
py_send("833 834 849 850 865 866 881 882 897 898 913 914 929 930 945 946 961 962 977 978")
py_send("993 994 1009 1010 1025 1026 1041 1042 1057 1058 1073 1074 1089 1090 1105 1106")
py_send("1121 1122 1137 1138 1153 1154 1169 1170 1185 1186 1201 1202 1217 1218 1233
1234")
py_send("1249 1250 1265 1266")

py_send("3 4 19 20 35 36 51 52 67 68 83 84 99 100 115 116 131 132 147 148 163 164 179")
py_send("180 195 196 211 212 227 228 243 244 259 260 275 276 291 292 307 308 323 324 339")
py_send("340 355 356 371 372 387 388 403 404 419 420 435 436 451 452 467 468 483 484 499")
py_send("500 515 516 531 532 547 548 563 564 579 580 595 596 611 612 627 628 643 644 659")
py_send("660 675 676 691 692 707 708 723 724 739 740 755 756 771 772 787 788 803 804 819")
py_send("820 835 836 851 852 867 868 883 884 899 900 915 916 931 932 947 948 963 964 979")
py_send("980 995 996 1011 1012 1027 1028 1043 1044 1059 1060 1075 1076 1091 1092 1107")
py_send("1108 1123 1124 1139 1140 1155 1156 1171 1172 1187 1188 1203 1204 1219 1220
1235")
py_send("1236 1251 1252 1267 1268")
py_send("#")

def HELICALL_material(failure_type,progressive_failure):

```

```

mat_name = "30"

py_send("*new_mater composite")
py_send("*mater_option general:state:solid")
py_send("*material_name")
py_send("%s" % mat_name)

py_send("*mater_append_submat CFRP_0")
py_send("*mater_submat_param 1 general:compos_ply_thick_percent 50")
py_send("*mater_submat_param 1 general:compos_ply_orient_angle_deg -30")
py_send("*mater_append_submat CFRP_0")
py_send("*mater_submat_param 2 general:compos_ply_thick_percent 50")
py_send("*mater_submat_param 2 general:compos_ply_orient_angle_deg 30")

# Element list
py_send("*add_material_elements")
py_send("11 12 27 28 43 44 59 60 75 76 91 92 107 108 123 124 139")
py_send("140 155 156 171 172 187")
py_send("188 203 204 219 220 235 236 251 252 267 268 283 284 299 300 315 316 331 332 347")
py_send("348 363 364 379 380 395 396 411 412 427 428 443 444 459 460 475 476 491 492 507")
py_send("508 523 524 539 540 555 556 571 572 587 588 603 604 619 620 635 636 651 652 667")
py_send("668 683 684 699 700 715 716 731 732 747 748 763 764 779 780 795 796 811 812 827")
py_send("828 843 844 859 860 875 876 891 892 907 908 923 924 939 940 955 956 971 972 987")
py_send("988 1003 1004 1019 1020 1035 1036 1051 1052 1067 1068 1083 1084 1099 1100
1115")
py_send("1116 1131 1132 1147 1148 1163 1164 1179 1180 1195 1196 1211 1212 1227 1228
1243")

```

```

py_send("1244 1259 1260 1275 1276")

py_send("153 154 169 170 185 186 201 202 217 218 233 234 249 250 265 266 281 282 297 298")
py_send("313 314 329 330 345 346 361 362 377 378 393 394 409 410 425 426 441 442 457 458")
py_send("473 474 489 490 505 506 521 522 537 538 553 554 569 570 585 586 601 602 617 618")
py_send("633 634 649 650 665 666 681 682 697 698 713 714 729 730 745 746 761 762 777 778")
py_send("793 794 809 810 825 826 841 842 857 858 873 874 889 890 905 906 921 922 937 938")
py_send("953 954 969 970 985 986 1001 1002 1017 1018 1033 1034 1049 1050 1065 1066 1081")
py_send("1082 1097 1098 1113 1114 1129 1130 1145 1146 1161 1162 1177 1178 1193 1194
1209")

py_send("1210 1225 1226 1241 1242 1257 1258 1273 1274")
py_send("9 25 41 57 73 89 105 121 137 138 122 106 90 74 58 42 26 10")
py_send("#")

def HOOP_material(failure_type,progressive_failure):

    mat_name = "90"

    py_send("*new_mater composite")
    py_send("*mater_option general:state:solid")
    py_send("*material_name")
    py_send("%s" % mat_name)

    py_send("*mater_append_submat CFRP_0")
    py_send("*mater_submat_param 1 general:compos_ply_thick_percent 50")
    py_send("*mater_submat_param 1 general:compos_ply_orient_angle_deg 90")
    py_send("*mater_append_submat CFRP_0")
    py_send("*mater_submat_param 2 general:compos_ply_thick_percent 50")

```

```

py_send("*mater_submat_param 2 general:compos_ply_orient_angle_deg 90")

# Element list

py_send("*add_material_elements")

py_send("13 14 15 16 29 30 31 32 45 46 47 48 61 62 63 64 77 78 79 80 93 94 95 96 109 110")
py_send("111 112 125 126 127 128 141 142 143 144 157 158 159 160 173 174 175 176 189 190")
py_send("191 192 205 206 207 208 221 222 223 224 237 238 239 240 253 254 255 256 269 270")
py_send("271 272 285 286 287 288 301 302 303 304 317 318 319 320 333 334 335 336 349 350")
py_send("351 352 365 366 367 368 381 382 383 384 397 398 399 400 413 414 415 416 429 430")
py_send("431 432 445 446 447 448 461 462 463 464 477 478 479 480 493 494 495 496 509 510")
py_send("511 512 525 526 527 528 541 542 543 544 557 558 559 560 573 574 575 576 589 590")
py_send("591 592 605 606 607 608 621 622 623 624 637 638 639 640 653 654 655 656 669 670")
py_send("671 672 685 686 687 688 701 702 703 704 717 718 719 720 733 734 735 736 749 750")
py_send("751 752 765 766 767 768 781 782 783 784 797 798 799 800 813 814 815 816 829 830")
py_send("831 832 845 846 847 848 861 862 863 864 877 878 879 880 893 894 895 896 909 910")
py_send("911 912 925 926 927 928 941 942 943 944 957 958 959 960 973 974 975 976 989 990")
py_send("991 992 1005 1006 1007 1008 1021 1022 1023 1024 1037 1038 1039 1040 1053 1054")

py_send("1055 1056 1069 1070 1071 1072 1085 1086 1087 1088 1101 1102 1103 1104 1117
1118")

py_send("1119 1120 1133 1134 1135 1136 1149 1150 1151 1152 1165 1166 1167 1168 1181
1182")

py_send("1183 1184 1197 1198 1199 1200 1213 1214 1215 1216 1229 1230 1231 1232 1245
1246")

py_send("1247 1248 1261 1262 1263 1264 1277 1278 1279 1280")

py_send("5 6 7 8 21 22 23 24 37 38 39 40 53 54 55 56 69 70 71 72 85 86 87 88 101 102 103")
py_send("104 117 118 119 120 133 134 135 136 149 150 151 152 165 166 167 168 181 182 183")
py_send("184 197 198 199 200 213 214 215 216 229 230 231 232 245 246 247 248 261 262 263")
py_send("264 277 278 279 280 293 294 295 296 309 310 311 312 325 326 327 328 341 342 343")

```

```

py_send("344 357 358 359 360 373 374 375 376 389 390 391 392 405 406 407 408 421 422 423")
py_send("424 437 438 439 440 453 454 455 456 469 470 471 472 485 486 487 488 501 502 503")
py_send("504 517 518 519 520 533 534 535 536 549 550 551 552 565 566 567 568 581 582 583")
py_send("584 597 598 599 600 613 614 615 616 629 630 631 632 645 646 647 648 661 662 663")
py_send("664 677 678 679 680 693 694 695 696 709 710 711 712 725 726 727 728 741 742 743")
py_send("744 757 758 759 760 773 774 775 776 789 790 791 792 805 806 807 808 821 822 823")
py_send("824 837 838 839 840 853 854 855 856 869 870 871 872 885 886 887 888 901 902 903")
py_send("904 917 918 919 920 933 934 935 936 949 950 951 952 965 966 967 968 981 982 983")
py_send("984 997 998 999 1000 1013 1014 1015 1016 1029 1030 1031 1032 1045 1046 1047")
py_send("1048 1061 1062 1063 1064 1077 1078 1079 1080 1093 1094 1095 1096 1109 1110
1111")
py_send("1112 1125 1126 1127 1128 1141 1142 1143 1144 1157 1158 1159 1160 1173 1174
1175")
py_send("1176 1189 1190 1191 1192 1205 1206 1207 1208 1221 1222 1223 1224 1237 1238
1239")
py_send("1240 1253 1254 1255 1256 1269 1270 1271 1272")
py_send("#")

#----- ORIENTATION -----

def orientation():
    # The anisotropic materials are direction dependent.
    # We need to adjust the ORIENTATION such that the fiber
    # direction follows the geometry of the structure.

    # Turn off indentify and plotting to be able to see the
    # element orientation arrows

```

```

py_send("*identify_none *regen")

py_send("*elements_wireframe")

py_send("*redraw")


orientation_composite()


# Save model:

py_send("*save_model")


def orientation_composite():

    # Orientation of the composite


    py_send("*new_orient")
    py_send("*orient_name")
    py_send("orient_composite_all")
    py_send("*add_orient_elements")
    py_send("composite")
    py_send("#")
    py_send("*orient_type edge23")


    py_send("check_upside_down")
    py_send("*flip_elements")
    py_send("all_selected")
    py_send("#"))


# ----- GEOMETRIC PROPERTIES -----

```

```

# Set the geometric properties:
def geometric_properties(geom_name):

    # Assume that one axisymmetric model is relevant

    py_send("*new_geometry")
    py_send("*geometry_name")
    py_send("%s_comp" % geom_name)
    py_send("*geometry_type mech_axisym_comp_cont")
    py_send("*geometry_option comp_cont_thickdir:second")
    #py_send("*geometry_option cdilatation:on")
    py_send("*add_geometry_elements ")
    py_send("composite")
    py_send("# ")

    py_send("*identify_geometries *regen")

    # Save model:
    py_send("*save_model")

    # ----- BOUNDARY CONDITIONS -----

    # Put on boundary conds; displacement restrictions:
def boundary_conditions():

```



```

# Displacement restrictions in the x ad z directions

py_send("*new_apply ")
py_send("*apply_name ")
py_send("displacement ")
py_send("*apply_type fixed_displacement ")
py_send("*apply_option dof_values:entered")
py_send("*apply_option ref_position:activation")
py_send("*apply_dof x *apply_dof_value x ")
py_send("*apply_dof z *apply_dof_value z ")
py_send("*add_apply_nodes ")
py_send("1361 1362 1363 1364 1365 1366 1367 1368 1369 1370 1371 1372 1373 1374 1375 1376
1377")
py_send("# ")

## py_send("*new_apply ")
## py_send("*apply_name ")
## py_send("point_load")
## py_send("*apply_type point_load")
## py_send("*apply_dof x *apply_dof_value x")
## py_send("*apply_dof_value x -1257000")
## py_send("*add_apply_nodes")
## py_send("1")
## py_send("#")
##

## # Add a point load at the innermost node, to model a closed tube
## # tie all nodes at the left boundary to the innermost node
## py_send("*new_link *link_class tie")

```

```

## py_send("*link_class tie *tie_type")
## py_send("100")
## py_send("*link_class tie *tied_node")
## py_send("2")
## py_send("*link_class tie *retained_node 1")
## py_send("1")
##
## py_send("*new_link *link_class tie")
## py_send("*link_class tie *tie_type")
## py_send("100")
## py_send("*link_class tie *tied_node")
## py_send("3")
## py_send("*link_class tie *retained_node 1")
## py_send("1")
##
## py_send("*new_link *link_class tie")
## py_send("*link_class tie *tie_type")
## py_send("100")
## py_send("*link_class tie *tied_node")
## py_send("4")
## py_send("*link_class tie *retained_node 1")
## py_send("1")
##
## py_send("*new_link *link_class tie")
## py_send("*link_class tie *tie_type")
## py_send("100")
## py_send("*link_class tie *tied_node")
## py_send("5")

```

```

## py_send("*link_class tie *retained_node 1")
## py_send("1")
##
## py_send("*new_link *link_class tie")
## py_send("*link_class tie *tie_type")
## py_send("100")
## py_send("*link_class tie *tied_node")
## py_send("6")
## py_send("*link_class tie *retained_node 1")
## py_send("1")
##
## py_send("*new_link *link_class tie")
## py_send("*link_class tie *tie_type")
## py_send("100")
## py_send("*link_class tie *tied_node")
## py_send("7")
## py_send("*link_class tie *retained_node 1")
## py_send("1")
##
## py_send("*new_link *link_class tie")
## py_send("*link_class tie *tie_type")
## py_send("100")
## py_send("*link_class tie *tied_node")
## py_send("8")
## py_send("*link_class tie *retained_node 1")
## py_send("1")
##
## py_send("*new_link *link_class tie")

```

```

## py_send("*link_class tie *tie_type")
## py_send("100")
## py_send("*link_class tie *tied_node")
## py_send("9")
## py_send("*link_class tie *retained_node 1")
## py_send("1")
##
## py_send("*new_link *link_class tie")
## py_send("*link_class tie *tie_type")
## py_send("100")
## py_send("*link_class tie *tied_node")
## py_send("10")
## py_send("*link_class tie *retained_node 1")
## py_send("1")
##
## py_send("*new_link *link_class tie")
## py_send("*link_class tie *tie_type")
## py_send("100")
## py_send("*link_class tie *tied_node")
## py_send("11")
## py_send("*link_class tie *retained_node 1")
## py_send("1")
##
## py_send("*new_link *link_class tie")
## py_send("*link_class tie *tie_type")
## py_send("100")
## py_send("*link_class tie *tied_node")
## py_send("12")

```

```
## py_send("*link_class tie *retained_node 1")
## py_send("1")
##
## py_send("*new_link *link_class tie")
## py_send("*link_class tie *tie_type")
## py_send("100")
## py_send("*link_class tie *tied_node")
## py_send("13")
## py_send("*link_class tie *retained_node 1")
## py_send("1")
##
## py_send("*new_link *link_class tie")
## py_send("*link_class tie *tie_type")
## py_send("100")
## py_send("*link_class tie *tied_node")
## py_send("14")
## py_send("*link_class tie *retained_node 1")
## py_send("1")
##
## py_send("*new_link *link_class tie")
## py_send("*link_class tie *tie_type")
## py_send("100")
## py_send("*link_class tie *tied_node")
## py_send("15")
## py_send("*link_class tie *retained_node 1")
## py_send("1")
##
## py_send("*new_link *link_class tie")
```

```

## py_send("*link_class tie *tie_type")
## py_send("100")
## py_send("*link_class tie *tied_node")
## py_send("16")
## py_send("*link_class tie *retained_node 1")
## py_send("1")
##
## py_send("*new_link *link_class tie")
## py_send("*link_class tie *tie_type")
## py_send("100")
## py_send("*link_class tie *tied_node")
## py_send("17")
## py_send("*link_class tie *retained_node 1")
## py_send("1")

# Add the bar indication names/colors of all bo-inds:
py_send("*identify_applys *regen ")

# Save model:
py_send("*save_model ")

# ----- APPLIED LOADS -----

def applied_loads(load_mode,load_type):

    if (load_type == "pressure"):

        # Inner pressure:

```

```

inner_press = 10 #100.0    # MPa (should be positive)

py_send("*new_apply ")
py_send("*apply_name ")
py_send("inner_pressure ")

if (load_mode == "table"):
    # Define a general load table that can be used for
    # both types of loads
    table_name = "table_time_load"
    v1_steps = 10
    f1_steps = 10

    make_time_load_table(v1_steps,f1_steps,table_name)

    py_send("*apply_type edge_load ")
    py_send("*apply_dof p *apply_dof_value p ")
    py_send("%f " % inner_press)
    py_send("*apply_dof_table p")
    py_send("%s" % table_name)
elif (load_mode == "multi_criteria"):
    py_send("*apply_type edge_load ")
    py_send("*apply_dof p *apply_dof_value p ")
    py_send("%f " % inner_press)

py_send("*apply_option dist_ld_contact:active")
py_send("*add_apply_edges")

```

```

py_send("1:3 17:3 33:3 49:3 65:3 81:3 97:3 113:3 129:3 145:3 161:3 177:3 193:3 209:3")

py_send("225:3 241:3 257:3 273:3 289:3 305:3 321:3 337:3 353:3 369:3 385:3 401:3 417:3")

py_send("433:3 449:3 465:3 481:3 497:3 513:3 529:3 545:3 561:3 577:3 593:3 609:3 625:3")

py_send("641:3 657:3 673:3 689:3 705:3 721:3 737:3 753:3 769:3 785:3 801:3 817:3 833:3")

py_send("849:3 865:3 881:3 897:3 913:3 929:3 945:3 961:3 977:3 993:3 1009:3 1025:3")

py_send("1041:3 1057:3 1073:3 1089:3 1105:3 1121:3 1137:3 1153:3 1169:3 1185:3 1201:3")

py_send("1217:3 1233:3 1249:3 1265:3")

py_send("# ")

# Add the names/colors of all bo-inds:
py_send("*identify_applys *regen ")

# Save model:
py_send("*save_model ")

def make_time_load_table(v1_steps,f1_steps,table_name):

    # Make a general load table applicable to

    # all applied loads

    # The load should be applied incrementally

    # for contact analysis problems with large

    # geometric deformations

    py_send("*new_md_table 1 1")

    py_send("table_name")

    py_send("%s" % table_name)

    py_send("*set_md_table_type 1")

    py_send("time")

    py_send("*set_md_table_min_v 1")

```



```

py_send("0.0")

py_send("*set_md_table_max_v 1")

py_send("1.0")

py_send("*set_md_table_step_v 1")

py_send("%f" % v1_steps)

py_send("*set_md_table_min_f 1")

py_send("0.0")

py_send("*set_md_table_max_f 1")

py_send("1.0")

py_send("*set_md_table_step_f 1")

py_send("%f" % f1_steps)

py_send("*table_add")

py_send("0.0 0.0")

py_send("1.0 1.0")

py_send("*set_md_table_label_v 1")

py_send("Time")

py_send("*set_md_table_label_f 1")

py_send("Force")


# ----- ELEMENT TYPES -----


def element_types():

    # When using anisotropic material properties

    # all elements are of same type


# Element type for composite: 20

```

```

# (= arbitrary quadrilateral axisymmetric ring)

elm_tp = 152

py_send("*element_type %d " % elm_tp)

py_send("all_existing")


#TOM: Remove the non-positive def option

#py_send("*loadcase_option nonpos:on")


##  if (load_mode == "table"):
##      # Use the load table for incremental loading:
##      py_send("*loadcase_option stepping:fixed")
##      py_send("*loadcase_value nsteps")
##      py_send("30")
##  elif (load_mode == "multi_criteria"):
##      # Use the multi-criteria option instead:
##      py_send("*loadcase_option stepping:multicriteria")


##      #Identify the contact bodies (i.e. elements and surfaces)
##  py_send("*identify_types *regen")


# Save model:

py_send("*save_model")


# ----- RUN SIMULATIONS -----


# Set the load case:

def load_case(load_mode):

```

```

py_send("*loadcase_type static")

#py_send("*add_loadcase_cbodies deformable_composite")


#TOM: Remove the non-positive def option
#py_send("*loadcase_option nonpos:on")


if (load_mode == "table"):

    # Use the load table for incremental loading:

    py_send("*loadcase_option stepping:fixed")

    py_send("*loadcase_value nsteps")

    py_send("30")

elif (load_mode == "multi_criteria"):

    # Use the multi-criteria option instead:

    py_send("*loadcase_option stepping:multicriteria")


def run_job(job_name,load_mode,failure_type):

    # Start a new job:

    py_send("*new_job")


    if (job_name != "NONE"):

        py_send("*job_name")

        py_send("%s" % job_name)


    # Run a mechanical analysis:

    py_send("*job_class mechanical ")

```

```

py_send("add_job_loadcases lcase1")

py_send("*job_option dimen:axisym")

if (load_mode == "table"):

    # Remove the pressure from the initial load list

    py_send("*remove_job_applys inner_pressure")


py_send("*job_option dimen:axisym")


# Contact part:
#py_send("*job_option frictype:coulomb_roll")
#py_send("*job_contact_table")
#py_send("ctable1")


# TOM 23.8.2007: Change this part to large strain and total Langrange
# Large deformation/strain case:

py_send("*job_option strain:large")

py_send("*job_option follow:on")

#py_send("large_strn_proc:tot_lagrange")


#py_send("*job_option strain:small")
#py_send("*job_option rotation:large")
#py_send("*job_option elasticity:l_strn_tot")
#py_send("*job_option cdilatation:on")

```

```

#py_send("*job_option assumedstrn:on")

# py_send("*job_option finite:on") # ...results in 3009 for
# 'm-c', and 3002 for 'table'

# Output file properties:

py_send("*job_option contact_info:on")
py_send("*job_option elevar:on")
py_send("*job_option impd:on")


# For the post process:

py_send("*add_post_tensor stress ") # stresses
py_send("*add_post_tensor cauchy ") # stresses
py_send("*add_post_var von_mises") # scalar
py_send("*add_post_tensor stress_p") # stresses in preferred sys


# Failure criterion - built-in type:
if (failure_type == "max_stress"):
    py_send("*add_post_var fail_1")
    py_send("*add_post_var fail_2")
    py_send("*add_post_var fail_3")
    py_send("*add_post_var fail_4")
    py_send("*add_post_var fail_5")
    py_send("*add_post_var fail_6")
    py_send("*add_post_var strngth_rat_1")
    py_send("*add_post_var strngth_rat_2")
    py_send("*add_post_var strngth_rat_3")
    py_send("*add_post_var strngth_rat_4")

```

```

py_send("*add_post_var strngth_rat_5")

py_send("*add_post_var strngth_rat_6")


# User defined sub:

# Fiber stresses:

py_send("*add_post_var user1")      # user1 = stress_f_11
py_send("user1")

py_send("*add_post_var user2")      # user2 = stress_f_22
py_send("user2")

py_send("*add_post_var user3")      # user3 = stress_f_33
py_send("user3")

py_send("*add_post_var user4")      # user4 = stress_f_12
py_send("user4")

py_send("*add_post_var user5")      # user5 = stress_f_23
py_send("user5")

py_send("*add_post_var user6")      # user6 = stress_f_31
py_send("user6")


# Failure - maximum stress criterion:

py_send("*add_post_var user7")      # user7 = max_stress_f_11
py_send("user7")

py_send("*add_post_var user8")      # user8 = max_stress_f_22
py_send("user8")

py_send("*add_post_var user9")      # user9 = max_stress_f_33
py_send("user9")

py_send("*add_post_var user10")     # user10 = max_stress_f_12

```

```

py_send("user10")

py_send("*add_post_var user11")      # user11 = max_stress_f_23

py_send("user11")

py_send("*add_post_var user12")      # user12 = max_stress_f_31

py_send("user12")


py_send("*job_option post_int_points:all")


# TOM 18.1.2010: Seems like it is best to generate the user
# subroutine *.exe files from command line input


# User defined sub

# Include user defined functions:

#user_path = "Z:\\rakettsimulering\\dea5212\\fourinch_bottle\\simulering\\fortranfiler\\plotv.f"


#user_path = "Z:\\rakettsimulering\\hvm2006\\fwd_closure\\fortranfiler\\plotv.f"

#user_path = "Z:\\rakettsimulering\\hvm2006\\fwd_closure\\fortranfiler\\puck2ux_tom.f"


#py_send("*job_usersub_file %s" % user_path)

## compile and save executable file

#py_send("*job_option user_source:compile_save")


##  # run saved executable file

##  py_send("*job_option user_source:run_saved")

```

```

# ...until here.....!!

# Save model:

py_send("*save_model")


##  # Sumbit the job:
##  py_send("*update_job ") # same as clicking on the "RUN" button
##  py_send("*submit_job 1 *monitor_job ")


#*****

#          MAIN PROGRAM

#*****

def main():

    # PREPROCESSING PART:

    # Options:

```



```

load_type = "pressure"

# Open a new model (...a bad way of doing it..!):
model_name = "model1"
path_name = "Z:\Marc\Analyser\Sylinder\Komposittelementer\90-30-90-10\\"

open_new_model(model_name,path_name)

# The composite mesh:
composite_file = "Z:\marc\patranfiler\thin-wall.out"
import_composite_file(composite_file)

# Set material properties:

#failure_type = "none"
failure_type = "max_stress"
#progressive_failure = "on"
progressive_failure = "off"
material_properties(failure_type,progressive_failure)

# Element orientation:
orientation()

# Contact bodies:
#contact_bodies()

```

```
# Set geometric properties:

geom_name = "geom"

geometric_properties(geom_name)


# Boundary conditions:

boundary_conditions()


# Externally applied loads:

load_mode = "table"

#load_mode = "multi_criteria"

applied_loads(load_mode,load_type)


# Element types:

element_types()


# COMPUTATIONAL PART:


# Load cases:

load_case(load_mode)


# Run a job:

job_name = "job1"

run_job(job_name,load_mode,failure_type)


return
```

```
if __name__ == '__main__':  
    main()
```